



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA**



CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL ARSÉNICO EN EL YACIMIENTO ROSARIO, REGIÓN DE TARAPACÁ, CHILE.



Memoria para optar al Título de Geóloga

María Luisa Mella Farías

Profesor Patrocinante: Dr. Osvaldo Rabbia Dalmasso
Profesional Guía: Geol. Yuan Tay Neves
Profesores de Comisión: Sr. Ramiro Bonilla Parra
MSc. Abraham González Martínez

Concepción, 2022



*Dedicada a mis padres, Erika y Manuel
Por su entrega, amor y enseñanzas.*

ÍNDICE

Página

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Ubicación y Accesos	2
1.3. Metodología de Trabajo	3
1.3.1. Etapa de Gabinete I	4
1.3.2. Etapa de Gabinete II	4
1.4. Trabajos Anteriores	5
1.5. Agradecimientos	6
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Marco Tectónico	8
2.2. Geología Distrital	10
2.2.1. Rocas Estratificadas	12
2.2.1.1. Formación Collahuasi	12
2.2.1.2. Formación Quehuita	13
2.2.1.3. Formación Cerro Empexa	14
2.2.1.4. Ignimbrita Huasco	14
2.2.1.5. Ignimbrita Ujina	14
2.2.1.6. Depósitos Aterrazados	15
2.2.1.7. Estratovolcanes	15
2.2.1.8. Ignimbrita Pastillos	15
2.2.1.9. Depósitos No Consolidados	16
2.2.2. Rocas Intrusivas	16
2.2.3. Estructuras	16
2.3. Geología del Yacimiento Rosario	18
2.3.1. Litología	19
2.3.1.1. Andesita (AND)	20
2.3.1.2. Dacita (DAC)	20
2.3.1.3. Toba (TOB)	20
2.3.1.4. Toba Roja (TOBR)	21
2.3.1.5. Unidad Sedimentaria (USED)	21
2.3.1.6. Pórfido Collahuasi (PCO)	21
2.3.1.7. Pórfido Rosario (PRO)	21
2.3.1.8. Diorita y Pórfido Diorítico (DIO)	22
2.3.1.9. Brechas Hidrotermales (BRH)	22
2.3.1.10. Brecha Ígnea (BRI)	22
2.3.2. Alteraciones	22

2.3.2.1. Alteraciones Tempranas	23
A. Potásica (K)	23
B. Propilítica (P)	24
C. Clorita-Sericita (CS)	24
2.3.2.2. Alteraciones Tardías	24
A. Fílica o Cuarzo-Sericita (QS)	24
B. Argílica (A)	24
C. Argílica Avanzada (AA)	25
2.3.2.3. Otras Alteraciones	25
A. Alteración Tipo Skarn	25
B. Alteración Tipo Horn	25
2.3.3. Zona Mineral	26
2.3.3.1. Zona Lixiviada (LIX)	26
2.3.3.2. Zona de Óxidos (OXI)	26
2.3.3.3. Zona Mixta (MIX)	26
2.3.3.4. Zona Secundaria (SEC)	26
2.3.3.5. Zona Primaria (PRI)	26
2.3.3.6. Zona Primaria Pirítica (PRIPY)	27
2.3.4. Estructuras	28
3. ARSÉNICO	30
3.1. Antecedentes del Arsénico	30
3.2. Arsénico en el Yacimiento	33
4. RESULTADOS	35
4.1. Análisis Bases de Datos de Sondaje	36
4.1.1. Generalidades	36
4.1.2. Estadística del Arsénico	36
4.1.2.1. Datos Estadísticos del Yacimiento	36
A. Litología	37
B. Alteración	38
C. Zona Mineral	39
D. Estructuras	40
4.1.2.2. Datos Estadísticos del Área de Estudio	41
A. Litología	42
B. Alteración	43
C. Zona Mineral	44
D. Estructuras	45
4.1.3. Relación de las Fallas Principales con el Arsénico	46
4.1.3.1. Falla Rosario	47
4.1.3.2. Falla Pique	48
4.1.3.3. Falla Última	49
4.2. Muestras Macroscópicas	50
4.2.1. Caracterización de la Mineralización de Arsénico	51
4.2.1.1. Vetas	51
4.2.1.2. Brecha de Falla	51

4.2.1.3. Brecha Hidrotermal Lixiviada	52
4.2.1.4. Toba	52
4.3. Análisis QEMSCAN	53
4.3.1. Caracterización mineral	55
4.4. Análisis Petro-Calcográfico	57
4.4.1. Descripción Mineralógica	58
4.4.1.1. Pirita	58
4.4.1.2. Calcopirita	59
4.4.1.3. Bornita	59
4.4.1.4. Calcosina	60
4.4.1.5. Digenita	61
4.4.1.6. Covelina	62
4.4.1.7. Enargita	62
4.4.2. Asociaciones Minerales	63
4.4.2.1. Asociación Calcopirita-Bornita	63
4.4.2.2. Asociación Bornita-Calcosina-Digenita	64
4.4.2.3. Asociación Pirita-Calcosina	65
4.4.2.4. Asociación Enargita-Bornita-Calcosina-Digenita	66
4.4.2.5. Asociación Enargita-Pirita.....	67
5. DISCUSIONES	69
5.1. Temporalidad de los Sulfuros de la Fase 11 y 13	69
5.1.1. Formación de Sulfuros en la Etapa Tardimagmática	69
5.1.1.1. Formación de Pirita y Calcopirita	69
5.1.1.2. Formación de Bornita	70
5.1.2. Formación de Sulfuros en la Etapa de Transición	71
5.1.2.1. Formación de Bornita	71
5.1.2.2. Formación de Calcosina y Digenita	71
5.1.3. Formación de Sulfuros en la Etapa Hidrotermal Principal	72
5.1.3.1. Formación de Pirita	72
5.1.3.2. Formación de Enargita	72
5.2. Relación del Arsénico con la Litología y la Alteración	73
5.2.1. Litología	73
5.2.2. Alteración	73
5.3. Arsénico como Indicador de Falla	74
5.4. Mineralización de Arsénico en Rosario	76
6. CONCLUSIONES.....	78
7. REFERENCIAS	80

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Mapa de ubicación y accesos del área de estudio	3
2. 1. Mapa esquemático con la ubicación de los yacimientos tipo pórfido asociado al Sistema de Fallas de Domeyko	10
2. 2. Mapa Geológico del Distrito de Collahuasi	11
2. 3. Mapa y perfil estructural del Distrito Collahuasi	18
2. 4. Modelo litológico en planta de pit Rosario	19
2. 5. Perfil litológico de pit Rosario	20
2. 6. Perfil de alteración en pit Rosario	22
2. 7. Modelo de alteración en planta de pit Rosario	23
2. 8. Modelo de zona mineral en pit Rosario	27
2. 9. Perfil de zona mineral en pit Rosario	27
2. 10. Mapa con estructuras principales del yacimiento Rosario	28
2. 11. Rajo Rosario con estructuras según su persistencia	29
3. 1. Minerales que contienen arsénico y su ocurrencia	30
3. 2. Concentración promedio en partes por millón (ppm) de arsénico en rocas	31
3. 3. Esquema conceptual idealizado de un pórfido de cobre-molibdeno	32
3. 4. Control que ejercen las estructuras sobre la ley de arsénico	34
3. 5. Perfil esquemático del yacimiento que muestra concentraciones de arsénico en las tres fallas principales	34
4. 1. Ubicación de Fases 11 y 13 en pit Rosario, y localización de muestras extraídas para el estudio	35
4. 2. Gráficos estadísticos con las concentraciones de arsénico en el yacimiento Rosario junto a diagrama de caja y tabla estadística	36
4. 3. Histograma de frecuencia de arsénico junto con tabla con distribución de datos de las concentraciones de As en ppm	37
4. 4. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) para cada litología en Rosario	38
4. 5. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) para alteraciones principales de Rosario	39
4. 6. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) para zonas minerales de Rosario	40
4. 7. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) según estructuras en Rosario	41
4. 8. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) según cada Fase de estudio en yacimiento Rosario	42
4. 9. Vista en planta del pit Rosario con las tres fallas principales y fallas menores en rojo	47
4. 10. Perfil de la distribución de leyes de arsénico en ppm en el yacimiento y en las tres fallas principales	47
4. 11. Diagrama de caja que muestra la relación entre el logaritmo de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Rosario	48

4.	12.	Gráfico que muestra la relación entre la mediana de la concentración y la distancia a la Falla Rosario	48
4.	13.	Diagrama de caja que muestra la relación entre el logaritmo de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Pique	49
4.	14.	Gráfico que muestra la relación entre la mediana de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Pique	49
4.	15.	Diagrama de caja que muestra la relación entre el logaritmo de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Última	50
4.	16.	Gráfico que muestra la relación entre la mediana de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Última	50
4.	17.	Muestras pertenecientes a vetas de la Fase 11	51
4.	18.	Muestra M-14 correspondiente a brecha de falla de la Fase 13	52
4.	19.	Muestra M-20 correspondiente a brecha hidrotermal lixiviada de la Fase 13	52
4.	20.	Muestra M-18 correspondiente a toba de la Fase 13	53
4.	21.	Leyenda utilizada en el análisis QEMSCAN junto con agrupación de elementos similares	54
4.	22.	Diagrama acumulativo de la mineralogía modal según porcentaje en masa de las muestras de este estudio	55
4.	23.	Diagrama de barras con los aportes de Cu (%) en cada muestra, de acuerdo con el contenido medido en las especies portadoras	57
5.	1.	Esquema de evolución magmática y precipitación de elementos en un pórfido .	74
5.	2.	Relación entre lineamientos y concentración de arsénico en el yacimiento Río Blanco-Los Bronces	75
5.	3.	Relación entre concentración de arsénico con lineamientos en el yacimiento Rosario	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página	
4.	1.	Estadística del arsénico en ppm para cada litología presente en Rosario	37
4.	2.	Estadística del arsénico en ppm para las alteraciones principales de Rosario	38
4.	3.	Estadística del arsénico en ppm para cada zona mineral de Rosario	39
4.	4.	Estadística del arsénico en ppm para estructuras presentes en Rosario	40
4.	5.	Estadística del arsénico en ppm según Fase 11 y Fase 13	41
4.	6.	Estadística del arsénico en ppm según cada litología perteneciente a las Fases 11 y 13 del yacimiento	43
4.	7.	Estadística del arsénico en ppm según cada alteración pertenecientes a las Fases 11 y 13 del yacimiento	44
4.	8.	Estadística del arsénico en ppm según cada zona mineral perteneciente a las Fases 11 y 13 del yacimiento	45
4.	9.	Estadística del arsénico en ppm según estructuras de las Fases 11 y 13 del yacimiento	46
4.	10.	Características de sistema QEMSCAN utilizado para el análisis de las muestras	54

4.	11.	Porcentaje en peso de minerales contenidos en cada una de las muestras extraídas para este estudio	56
----	-----	--	----

ÍNDICE DE MICROFOTOGRAFÍAS

Tabla		Página	
4.	1.	Pirita en las muestras en estudio	58
4.	2.	Calcopirita en las muestras en estudio	59
4.	3.	Bornita en las muestras en estudio	60
4.	4.	Calcosina en las muestras en estudio	61
4.	5.	Digenita en las muestras en estudio	61
4.	6.	Covelina en muestra en estudio	62
4.	7.	Enargita en las muestras en estudio	63
4.	8.	Asociación calcopirita-bornita	64
4.	9.	Asociación bornita-calcosina-digenita	65
4.	10.	Asociación pirita-calcosina	66
4.	11.	Asociación enargita-bornita-calcosina-digenita	67
4.	12.	Asociación enargita-pirita	68



RESUMEN

El Distrito Minero Collahuasi, ubicado en la región de Tarapacá, corresponde a un *cluster* de pórfidos que incluye los depósitos Ujina y Rosario, emplazados en la franja de pórfidos del Eoceno superior-Oligoceno inferior.

El presente trabajo caracteriza la ocurrencia y texturas de las fases minerales que contienen arsénico en las Fases de explotación 11 y 13 del yacimiento Rosario. Para entender el comportamiento y distribución del arsénico en el yacimiento se utilizaron las bases de datos de sondajes, pozos de tronadura, modelo de bloques y modelo estructural en el *software* Leapfrog. Mediante estadística se determinaron las litologías, alteraciones y tipo de estructuras con la mayor concentración de arsénico, que correspondían a unidades de brechas y tobas, alteraciones argílica intermedia y argílica avanzada y vetas. Además, se determinó la influencia de las principales fallas del yacimiento en la distribución del arsénico. Las mayores anomalías se concentran en las proximidades de las Fallas Última, Pique y Rosario, lo que indicaría que el arsénico podría ser un buen indicador de fallas. El muestreo incluyó 24 muestras macroscópicas representativas de los diferentes sectores del área de estudio. Se describieron las muestras y se seleccionaron 15 para realizar cortes pulido-transparentes y análisis QUEMSCAN, para caracterizar microscópicamente los estilos de mineralización y ocurrencia de los minerales portadores de arsénico y determinar las posibles diferencias y/o similitudes entre las fases de explotación de estudio. Las observaciones tanto macro como microscópicas indican que la enargita es el único mineral portador de arsénico. No se reconocen diferencias entre la enargita de la Fase 11 y la de la Fase 13. La baja concentración de este mineral en la Fase 13 dificultó la comparación. Se corrobora lo obtenido en la estadística donde en las muestras que presentaban mayor contenido de enargita dominaba las alteraciones argílica intermedia y argílica avanzada, lo cual coincide con las condiciones propicias para que se genere la precipitación de este mineral, es decir un ambiente de alta sulfidización.

Las ocurrencias de la enargita, incluyen tanto vetillas como disseminación como granos aislados rellenando espacios, también fue posible distinguirla en cúmulos asociada con minerales como digenita, calcosina, bornita y calcopirita. La textura más característica de este mineral fue la de reemplazo, es posible apreciarla en bordes y en microfracturas de digenita y calcosina, las que a su vez reemplazaban a bornita y calcopirita. Por último, se determinó la temporalidad de los sulfuros estableciéndose que la enargita se formó durante las etapas tardías del yacimiento.

1. INTRODUCCIÓN

El Distrito Minero Collahuasi se encuentra ubicado en la región de Tarapacá, e incluye los depósitos Ujina y Rosario, emplazados en la porción norte de la franja de pórfidos Eoceno superior-Oligoceno inferior. La Compañía se dedica a la extracción y producción de concentrado de cobre, siendo su producto principal de exportación, mientras que el molibdeno es el subproducto más importante.

La investigación se centra en el yacimiento Rosario, el cual corresponde a un depósito tipo pórfido Cu-Mo con sobreimposición epitermal de alta sulfuración ubicado en el extremo norte del Sistema de Fallas de Domeyko, este tipo de depósito se relaciona con grandes cantidades de arsénico (As).

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza. El As presente en el medioambiente proviene de fuentes naturales, y generalmente asociadas a procesos geológicos, como la meteorización a partir de rocas parentales o las emisiones volcánicas (Bundschuh y otros, 2008).

Entre los minerales que pueden contener arsénico, se encuentra la pirita arsénica $[\text{Fe}(\text{S},\text{As})_2]$, la arsenopirita (FeAsS), el rejalgar (AsS), el oropimente (As_2S_3), la cobaltita (CoAsS), la niquelita (NiAs) y la escorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), también se presenta en algunos sulfuros complejos, como la enargita (Cu_3As_4) y la tennantita $(\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$, siendo estos últimos de gran importancia en el área de estudio ya que contienen cobre. Debido a la gran exigencia que el mercado pide en la calidad de los productos, se arriesgan penalizaciones en los concentrados que la compañía desea exportar, si estos presentan altos contenidos de impurezas en los concentrados (ej.: arsénico > 150 ppm), por lo que nace la necesidad de estudiar en detalle las características mineralógicas, el estilo de mineralización, la ocurrencia y la distribución de las fases minerales asociadas al arsénico, con la finalidad de aportar en la optimización de procesos mineros y metalúrgicos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Caracterizar la ocurrencia y texturas de las fases minerales que contienen arsénico, junto con su relación con las alteraciones presentes dentro del yacimiento Rosario y los factores que controlan la mineralización.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar muestras con criterio de representatividad de sectores con diferentes leyes de As.
- Caracterizar los estilos de mineralización y ocurrencia del arsénico, identificando dominios mineralógicos para este elemento.
- Evaluar posibles controles de la litología, alteración, y mineralización en la ocurrencia del arsénico.
- Determinar diferencias entre minerales portadores de arsénico que se encuentran en diferentes Fases de explotación del yacimiento.

1.2. Ubicación y Accesos

El distrito Collahuasi se localiza en las coordenadas $20^{\circ}58'17.95''S$ y $68^{\circ}42'13.84''W$, como se puede observar en la Figura 1.1, en el altiplano de la Región de Tarapacá, Chile, pertenece a la comuna de Pica y se ubica a 170 km aproximadamente al sureste de la ciudad de Iquique, cuenta con elevaciones que van desde 3.800 a 4.600 m s.n.m. El área de estudio se centra en el yacimiento Rosario, ubicado entre las coordenadas 7.681.250 N/530.000 E y 7.680.250 N/531.250 E.

Para acceder a faena Collahuasi desde la ciudad de Iquique, por la ruta 16, se toma el empalme con la ruta 5 norte, en dirección sur por 7 km hasta llegar a la ciudad de Pozo Almonte, donde se sigue la ruta A-65 por aproximadamente 14 km hasta el cruce con la ruta A-687, se recorren 174 km para finalmente ingresar al lugar a través del sector de Garita Norte de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

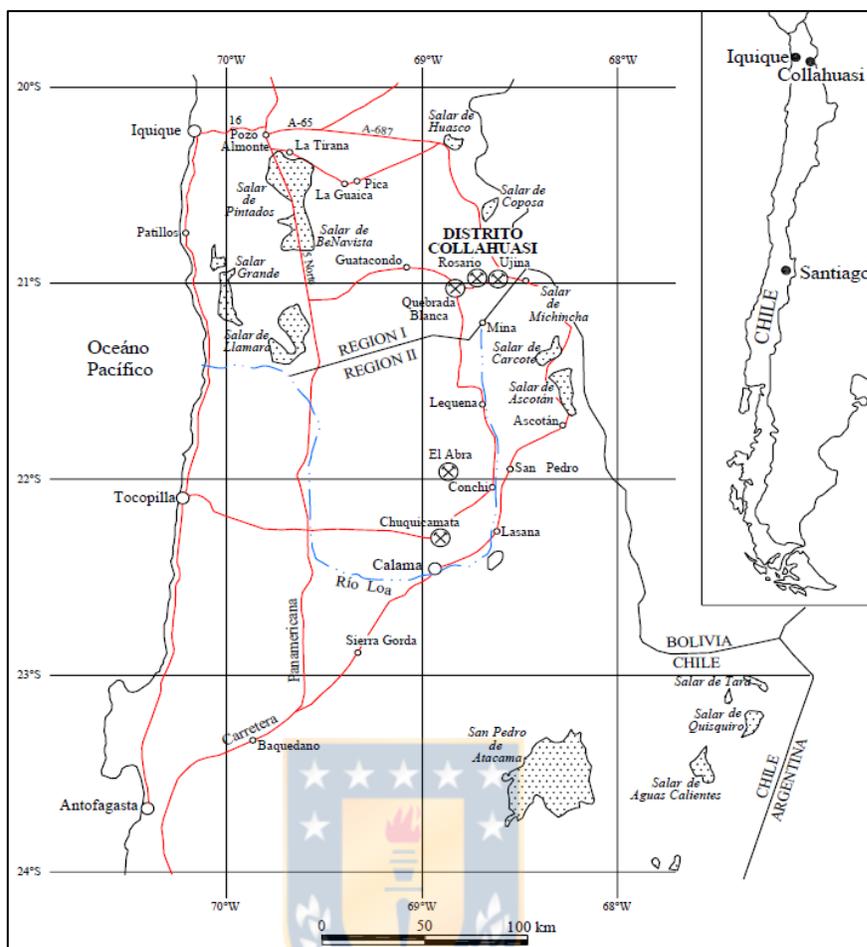


Figura 1.1. Mapa de ubicación y accesos del área de estudio. Extraído de Muñoz (2009).

1.3. Metodología de Trabajo

Para poder llevar a cabo el trabajo de investigación, la metodología se dividió en dos etapas, estas son: etapa de gabinete 1, la que consistió en primera instancia en una recopilación bibliográfica y un análisis de la base de datos de sondeos histórica, y la Etapa de Gabinete 2 que corresponde a un trabajo de laboratorio que permite obtener la información necesaria para realizar el presente trabajo. A continuación, se describen las actividades desarrolladas en cada una de las etapas.

1.3.1. Etapa de Gabinete I

Se realiza una recopilación bibliográfica referente al tema y al área de estudio, donde se revisan documentos publicados e inéditos, ya sea publicaciones, reportes, informes, y memorias o tesis

acerca de Collahuasi con el objetivo de formar el marco teórico y a su vez generar una recopilación de antecedentes asociados al arsénico dentro del yacimiento, así como información general de este elemento para poder llevar a cabo el trabajo. Posterior a esto se procede al análisis de la base de datos de sondajes que corresponde a datos históricos de sondajes (rosbd020320_1) en el yacimiento Rosario, la cual contiene múltiples parámetros como litología, alteración, zona mineral, estructuras, junto a datos de concentraciones de variados elementos, entre ellos el arsénico, que corresponde al de interés. Además, estos datos son ingresados en el *software* de modelamiento LeapfrogGeo para poder visualizar y entender el yacimiento, con ayuda del mismo programa es posible realizar estadística, esto permite observar el comportamiento del arsénico en función de otros elementos de interés, y su relación con la litológica, zona mineral, etc, así como también restringir este comportamiento a las Fases de estudio.

1.3.2. Etapa de Gabinete II

Para esta segunda etapa, personal de la empresa extraen 24 muestras del pórfido Rosario pertenecientes a dos Fases de explotación, correspondientes a las Fases 11 y 13, procurando que las rocas fueran diferentes entre sí, para que de esta manera se pueda obtener una buena información del área de estudio. A estas 24 muestras se les realizó una descripción de manera macroscópica, identificando posibles alteraciones, roca original, minerales de arsénico, entre otros. Luego se seleccionaron 15 muestras, las cuales fueron enviadas al laboratorio para que le realizaran los trabajos correspondientes, eliminando aquellas de apariencia similar a otras, así como algunas en las que no se detectaba a simple vista minerales portadores de arsénico.

Las 15 muestras fueron enviadas al Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA), organismo que fue encargado de realizar la confección de secciones pulido-transparentes, así como también un análisis mineralógico de alta definición mediante QEMSCAN (*Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning electron microscopy*) este corresponde a un método no destructivo de carácter semicuantitativo que se basa en la identificación de fases minerales a través de la combinación de imágenes de electrones retrodispersados, lo que permite obtener entre otras cosas el tamaño de granos y partículas, el tipo de partícula y la proporción de las especies minerales presente.

Los cortes pulido-transparentes fueron observados y analizados en los microscopios ópticos de la Universidad de Concepción, llevando a cabo una descripción mineralógica detallada, tanto de alteración como de mineralización metálica, orientada a caracterizar los estilos de mineralización

y ocurrencia de las fases portadoras de arsénico en el yacimiento, como también su relación con los otros minerales que pueden ser observados.

Una vez que se realiza el estudio mediante QEMSCAN, y se obtiene el informe de este análisis, junto con la observación realizada en microscopio se procede a realizar un análisis para extraer toda la información sobre el arsénico albergado en pórfido Rosario, permitiendo realizar una caracterización completa de los estilos de mineralización y de las especies minerales donde se concentra el arsénico en el yacimiento.

1.4. Trabajos Anteriores

- Vergara (1978) realiza un levantamiento geológico del “Cuadrángulo Ujina” a escala 1:50.000, de la Carta Geológica de Chile.
- Münchmeyer y otros (1984) efectúan dataciones radiométricas y definen unidades estratigráficas informales, además, hacen una recopilación de antecedentes estructurales del distrito.
- Vergara y Thomas (1984) publican la “Hoja Collacagua” escala 1:250.000, de la carta geológica de Chile, en ella se redefine la edad y litología de la Formación Collahuasi.
- Dick y otros (1994) definen la mineralogía, paragénesis, geoquímica, emplazamiento y control estructural de las vetas de Cu-Ag-As de Rosario.
- Munizaga (1995) efectúa dataciones de ^{40}Ar - ^{39}Ar en los stocks porfídicos de Rosario, Ujina, Inca, Inés y Collahuasi, con el objetivo de mejorar la geocronología de los eventos intrusivos de los yacimientos Ujina y Rosario.
- Bisó y otros (1998) llevan a cabo una caracterización geológica de los yacimientos Rosario y Ujina, y confeccionan modelos sobre la formación de ambos depósitos.
- Masterman (2003) realiza el estudio de la evolución estructural y geoquímica del sistema magmático-hidrotermal en el yacimiento Rosario analizando el marco tectónico y la arquitectura del basamento, logrando determinar la evolución petrogenética presente en el distrito.
- Masterman y otros (2004) realizan dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y Re-Os en los depósitos de Rosario y Ujina, con el fin de obtener la relación con el sistema de vetas de Cu-Ag de Rosario, además, a partir de inclusiones fluidas efectúan el estudio del emplazamiento estructural y geoquímico de los fluidos del pórfido Rosario y del sistema epitermal de vetas de Cu-Ag-Au.
- Munizaga y otros (2008) a partir de estudios de geoquímica en el distrito de Collahuasi, logrando indicar que el ambiente magmático del área corresponde a una fusión cortical con adición de

magmas carboníferos tardíos de otras fuentes y adición de magmas de fuentes primitivas atribuibles al Triásico Inferior.

- AURUM (2009) lleva a cabo el estudio geológico-metalogénico del Distrito Collahuasi, junto con la confección de dos mapas con escalas 1:25.000 y 1:50.000.
- Baker y otros (2010) estudian la variación de isótopos de Talio en la Formación Collahuasi, donde lograron concluir que los cambios en la concentración se deben a reacciones hidrotermales que destruyen las fases ricas en K y Rb.
- Ireland (2010) confecciona el marco geológico de los depósitos minerales del distrito de Collahuasi.
- Avalos (2019) estudia la petrografía de las inclusiones fluidas en el yacimiento Rosario con la finalidad de determinar parámetros para la exploración, en este estudio determina que existen al menos dos pulsos mineralizadores en el yacimiento.
- Quiroga (2019) realiza la caracterización y modelamiento de las vetillas en el yacimiento Rosario, con el objetivo de determinar su geometría y distribución, además de definir características, cronología y orientaciones de las vetillas.
- Vivanco (2019) confecciona un modelo de la ocurrencia del molibdeno en el rajo Rosario, con el fin de determinar un margen de mejoramiento en la recuperación de Mo.
- Garay (2021) realiza un modelamiento estructural de la ocurrencia y distribución del arsénico en el yacimiento Rosario con el objetivo de disminuir la incertidumbre geológica.

1.5 Agradecimientos

Quisiera agradecer a la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi por brindarme la oportunidad de ser parte del Programa de Prácticas y Memorias 2021 y financiar el presente trabajo.

Doy las gracias por su guía y apoyo a los profesionales que fueron mis tutores en lo que duró mi memoria, Yuan Tay y Josefa Quiroga, así como también a Reycardo Orbezo por la entrega de material acerca del yacimiento y a los profesionales de GEOBLAST que me ayudaron a conseguir las muestras de la mina, realizaron descripciones, me enviaron fotografías y finalmente me las enviaron hasta el laboratorio, permitiendo que a pesar de no haber podido ir a terreno continuara con mi memoria.

Agradezco a todos los profesores del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Concepción por los conocimientos entregados a lo largo de mis años de estudio, en especial a mi profesor guía Osvaldo Rabbia por aceptar ayudarme, su disponibilidad a consultas y correcciones de este trabajo, a mis profesores de comisión Ramiro Bonilla y Abraham González por darme el trabajo de leer la memoria, corregirla y ayudarme a mejorarla, a la profesora Verónica Oliveros y al profesor Luis Arturo Quinzio, ambos jefes de carrera, los que siempre fueron amables, y me ayudaron si lo necesitaba, también me gustaría mencionar a la profesora Fernanda Álvarez porque valoro y aprecio muchísimo la disposición que tuvo para ayudar, abriéndome las puertas de su hogar para que pudiera observar en microscopio las muestras durante el tiempo de pandemia.

Quiero dar gracias a mis padres Manuel Mella Y Erika Farias, ya que sin ellos esto no hubiera sido posible, gracias por haberme apoyado y brindado las herramientas para lograr una de las metas más importantes de mi vida, y gracias por entregar lo mejor de cada uno en beneficio de mi desarrollo como persona, les estaré eternamente agradecida por todo lo que me han brindado, en especial por enseñarme lo que significa el amor, igualmente me gustaría agradecer a mis hermanos Erika, Manuel y Germán por ser un ejemplo para mí, por quererme y cuidarme como a una hija, y por toda la confianza que me han tenido siempre. A mis cuñados por todo el cariño y por darme a mis sobrinos que tanto adoro, los que me han entregado risas infinitas y un amor indescriptible.

Quisiera agradecer en especial a Erika y su familia por hacerme sentir parte de ellos, por quererme y cuidarme, brindarme infinita ayuda siempre y por sobre todo por el apoyo que me entregaron al tomar la decisión de estudiar esta bella carrera.

Me gustaría agradecer a la familia de Diego por abrirme las puertas de su hogar, cuidarme y entregarme mucho cariño durante mi etapa universitaria en Concepción, lejos de mi hogar.

Finalmente, quisiera agradecer a Diego, con quien compartimos más de 6 años de carrera, en los que sin duda vivimos momentos únicos y a veces difíciles, pero siempre nos apoyamos mutuamente, sobre todo en esta última etapa para convertirnos en geólogos, solo me queda agradecer por confiar siempre en mis capacidades, alentarme y por prestarme tanta ayuda para enfrentar todas las adversidades que aparecieron en el camino, sacando lo mejor de mí, gracias por hacer que mis años de universidad fueran inolvidables.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Tectónico

Ramos (2010) afirma que en el super continente Gondwana, se han interpretado múltiples acreciones de terrenos en el margen occidental donde se encuentra Chile. En el Proterozoico ocurre la acreción del *terrane* de Arequipa en el margen occidental de Gondwana, posterior a esto, desde el Cámbrico hasta el Ordovícico Inferior existe un margen pasivo (Ramos y otros, 1986). Durante el Devónico, se forma un prisma de acreción producto de la subducción y acreción del terreno Chilena (Charrier y otros, 2007).

Según Charrier y otros (2007) en el Pérmico inferior acontece la reactivación de la subducción, desarrollándose un arco magmático Permo-Triásico con una cuenca de trasarco asociada. Estos depósitos forman parte del basamento cristalino en la actual cordillera Domeyko. Oliveros y otros (2020) indican que la subducción permanece activa hasta el Jurásico, pero la dinámica de este proceso varía. En el Pérmico medio comienza una continua profundización del *slab* debido a la disminución de la velocidad de subducción, lo cual en el Triásico provoca un régimen extensional en la corteza (Del Rey y otros, 2016).

En el Jurásico Medio a Cretácico Inferior la convergencia oblicua provoca una deformación transtensional, hay un arco magmático activo en la actual cordillera de la Costa generando la Formación La Negra, con una extensa cuenca de trasarco asociada como la cuenca ensiálica de Tarapacá (Charrier y otros, 2007).

El arco magmático migra hacia el este en el Cretácico Inferior, luego de un cambio en el ángulo de subducción a tipo Chilena, se inicia la Fase Peruana que produce inversión tectónica de la cuenca de trasarco alzando la zona de la cuenca Tarapacá y transformándola en un elemento positivo del relieve protocordillera de Domeyko (Ramos, 2010). La compresión es máxima durante la inversión de las cuencas, esto produce la reactivación de antiguas fallas normales en una modalidad inversa (Skarmeta, 1991). Según Günther y otros (1997), junto a Padilla y otros (2001), las estructuras que limitaron el borde oriental de las cuencas Jurásicas de trasarco definen el Sistema de Falla

Domeyko, actualmente este sistema está conformado por una serie de fallas de orientación general N5°E, verticales a subverticales que delimitan bloques alzados a lo largo de la Cordillera Principal, desde los 21° hasta los 26° 30' S.

Según Charrier y otros (2007) la sedimentación continental y el volcanismo menor asociado con el arco del Cretácico continuaron en el norte de Chile hasta el Eoceno inferior. A comienzos del Eoceno se produce la Fase Incaica, asociada a esta Fase ocurre el plegamiento de los depósitos de antepaís, esto coincide con un máximo en la tasa de convergencia asociada a una considerable reducción de la oblicuidad de convergencia (Charrier y otros, 2007).

En el Cenozoico, el Sistema de Fallas Domeyko es reactivada como una estructura transcurrente y se emplazaron algunos de los yacimientos de pórfidos de cobre más grandes del mundo.

Hacia finales del Eoceno cesa el volcanismo, hasta la erupción de ignimbritas del Mioceno (Mpodozis y Ramos, 2008). El cese del volcanismo andino central entre 50 Ma y 27 Ma se atribuye a la subducción de una sección de losa plana bajo el sur de Perú y el norte de Chile. La intrusión de magmas félsicos a intermedios asociados con la mineralización pórfidos de Cu y epitermales del Eoceno superior-Oligoceno inferior en el Sistema de Fallas de Domeyko (Figura 2.1), como Quebrada Blanca, Collahuasi, Chuquicamata, entre otros, ocurrió durante el hiato volcánico (Ramos, 2010). El frente volcánico del Mioceno se ensanchó hacia el oeste a través del altiplano boliviano hasta la posición actual del arco volcánico (Camus, 2003).

Las altas tasas de convergencia durante gran parte del Mioceno producen engrosamiento cortical y gran alzamiento tectónico relacionado a pulsos compresivos de las Fases tectónicas Pehuenche y Quechua (Quiero y otros, 2022).

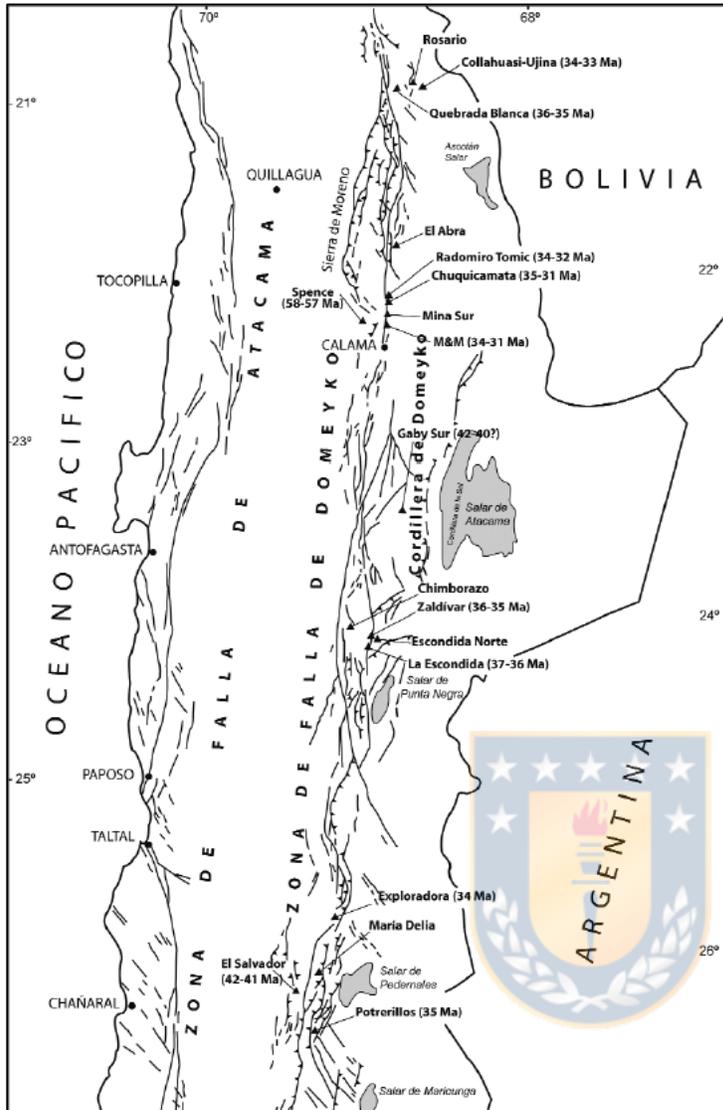


Figura 2.1. Mapa esquemático con la ubicación de los yacimientos tipo pórfido asociado al Sistema de Fallas de Domeyko. Extraído de Charrier y otros (2009).

2.2. Geología Distrital

El Distrito Collahuasi se define como un *cluster* de pórfidos de Cu-Mo ubicados al extremo norte de la franja del Eoceno-Oligoceno, contiene yacimientos de pórfido, estos son Ujina y Rosario, donde a este último se le asocia un epitermal de alta sulfidación con vetas de cobre y plata, las cuales llevan como nombre la Poderosa, Moctezuma y La Grande. Además, al noroeste de Rosario se encuentra el yacimiento exótico de cobre Huinquentipa hospedado en gravas (Camus, 2003). Según Bisso y otros (1998), el Distrito Collahuasi se encuentra limitado por dos sistemas estructurales principales de escala regional, los cuales corresponden a la Falla de Domeyko o Falla Oeste por el sector occidental con dirección N-S, y la Falla El Loa por el sector oriental por el

actual arco magmático, estos constituyen los límites de un *horst* con rocas paleozoicas, flanqueado por rocas mesozoicas y cenozoicas. El autor agrupa las unidades geológicas presentes en el distrito en tres bloques tectónicos, los cuales se clasifican en bloque occidental, central y oriental (Figura 2.2).

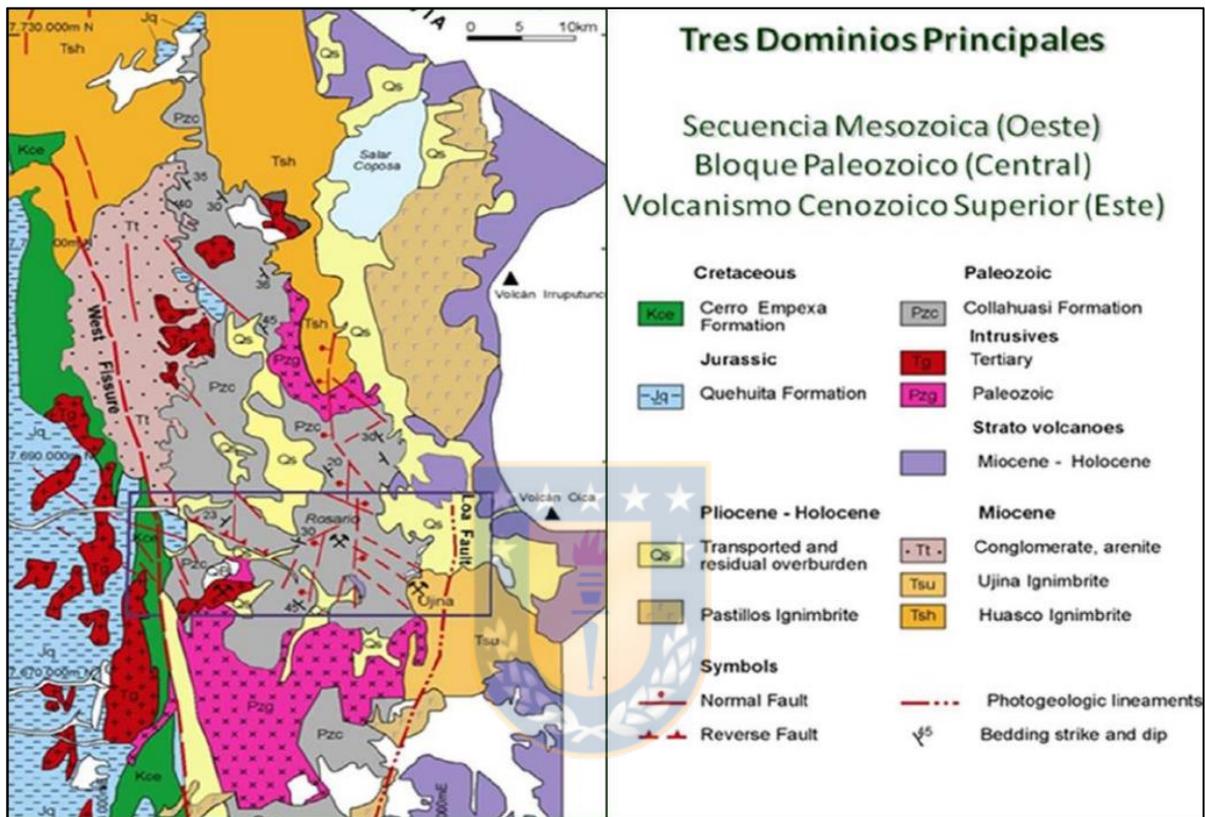


Figura 2.2. Mapa geológico del Distrito de Collahuasi. Extraído de carta geológica del SERNAGEOMIN, Hoja Collacagua, Región de Tarapacá, mapa escala 1:250.000 de Vergara y Thomas (1984).

El bloque occidental se compone de rocas de edad mesozoica y se caracteriza por presentar plegamiento en rocas sedimentarias marinas jurásicas pertenecientes a la Formación Quehuita, además, se ha descrito la Formación Cerro Empexa. El bloque central posee basamento Paleozoico asociado a plutones graníticos, los cuales intruyen a la Formación Collahuasi, secuencia volcano-sedimentaria. Posteriormente en el Eoceno-Oligoceno estas rocas sufren la intrusión por pórfidos mineralizados, los cuales dan origen a los depósitos del distrito. El bloque oriental se encuentra al este de la Falla El Loa y se caracteriza por la presencia de cubiertas ignimbríticas y depósitos volcanoclásticos del Neógeno a Cuaternario.

2.2.1. Rocas Estratificadas

La secuencia estratigráfica del distrito Collahuasi se compone principalmente de rocas volcano-sedimentarias de composición andesítica a riolítica. Estas han sido divididas en unidades litoestratigráficas formales e informales que abarcan desde el Paleozoico superior hasta la actualidad.

Las descripciones litológicas que se presentan a continuación se basan en la “Hoja Collacagua” escala 1: 250.000, de la Carta Geológica de Chile, realizada por Vergara y Thomas (1984), además de los trabajos de Münchmeyer y otros (1984), Tomlinson y otros (2001) y Mastermann, (2003).

2.2.1.1. Formación Collahuasi

La Formación Collahuasi fue definida por Vergara (1978) y corresponde a una unidad volcano-sedimentaria de aproximadamente 4 km de espesor, está constituida en su mayoría por andesitas, dacitas, riolitas, tobas, y cuerpos intrusivos menores. Las rocas volcánicas están compuestas de dos o más ciclos de flujos andesíticos a riolíticos con intercalaciones sedimentarias de calizas, areniscas, depositadas en un ambiente continental (Bisso y otros, 1998). Se diferencian dos eventos magmáticos principales, uno ocurrido en el Pérmico inferior a los 296 Ma aproximadamente y otro en el Triásico medio a los 242 Ma aproximadamente (AURUM, 2009).

Los límites geográficos que controlan la extensión y distribución de la Formación Collahuasi corresponden a la Ignimbrita Huasco hacia el norte (Masterman, 2003), hacia el sur se extiende hasta Chuquicamata, pero está ausente más allá de Calama, y el límite oeste corresponde al Sistema de Fallas de Domeyko (Bisso y otros, 1998), el límite este no está expuesto, pero probablemente este dado por la presencia de la Falla Loa (Masterman, 2003).

Münchmeyer y otros (1984) dividen esta Formación en tres unidades informales, las cuales corresponden a:

- Unidad La Grande: Esta secuencia se compone de rocas riolíticas, dacíticas y andesíticas con intercalaciones de areniscas y brechas sedimentarias, tiene una potencia de 3.000 m y aflora en el sector sur del Distrito. Dataciones de K/Ar en hornblenda le otorgan una edad mínima Permo-Triásico. Esta unidad está intruida por un batolito granodiorítico Permo-Triásico, e infrayace de

manera discordante a las unidades Condor y Capella en el sector de Rosario, y a la Formación Chacarillas de edad jurásica al noroeste de Quebrada Blanca, así como también a unidades volcanoclásticas del Eoceno (Münchmeyer y otros, 1984).

- Unidad Capella: Esta unidad está formada por coladas riolíticas alternadas con lentes y horizontes de areniscas y calizas. Tiene una potencia mínima de 1.700 m, sobreyace en discordancia angular a la Unidad La Grande. Aflora en el sector noroeste del distrito, en las cercanías de la localidad Capella y se le asigna una edad Triásico y/o Jurásico (Münchmeyer y otros, 1984).

- Unidad Cónдор: Corresponde a una secuencia de riolitas con un horizonte basal de areniscas y calizas. Tiene una potencia mínima de 1.050 m. Aflora en la serranía que separa Rosario de la localidad de Ujina. Los eventos sedimentarios son semejantes entre esta unidad y Capella, pero se ha preferido diferenciarlas debido a su discontinuidad distrital y a las características distintivas que presentan sus riolitas (Münchmeyer y otros, 1984).

2.2.1.2. Formación Quehuita

Fue definida por Vergara y Thomas (1984), corresponde a una secuencia marino-continental, que sobreyace en discordancia angular y de erosión, a la Formación Collahuasi e infrayace de igual forma a la Formación Cerro Empexa (Vergara y Thomas, 1984; Münchmeyer y otros, 1984). Se divide en dos miembros, el Miembro Inferior está compuesto por rocas sedimentarias bien estratificadas en capas de 0,10 a 2 m de potencia, con predominancia de rocas calcáreas y lutitas, en la base presenta una unidad clástica compuesta por conglomerados y areniscas de color amarillo a rojizo, este Miembro contiene abundantes fósiles marinos, que permiten determinar una edad jurásica, el espesor total oscila entre los 800 y 1.200 m; el Miembro Superior está constituido por una secuencia bien estratificada de areniscas y limolitas de color rojo oscuro, con intercalaciones de limolitas verdes y areniscas cuarcíferas pardas. Estas rocas presentan estratificación cruzada, laminación paralela, restos vegetales fósiles, y niveles arenosos en la parte superior con huellas de dinosaurios, el miembro tiene un espesor de aproximadamente 1.300 m (Tomlinson y otros, 2001). La depositación de esta Formación se llevó a cabo en una cuenca extensional de trasarco formada durante el desarrollo del arco Jurásico en el norte de Chile, estratos de crecimiento en ambos miembros indican que la depositación ocurrió en un ambiente extensional que evoluciona desde un ambiente marino profundo inicial, que gradualmente pasa a un ambiente marino somero producto de un evento regresivo (Masterman, 2003).

2.2.1.3. Formación Cerro Empexa

Corresponde a una secuencia elongada de orientación N-S constituida por andesitas, dacitas y brechas volcánicas, con intercalaciones de areniscas rojas y conglomerados (Vergara y Thomas, 1984), el espesor mínimo es de 1.860 m para toda la Formación (Tomlinson y otros, 2001). Esta formación sobreyace en discordancia angular y de erosión a la Formación Quehuita e infrayace, con la misma relación, a la Ignimbrita Huasco y a gravas del Mioceno medio-superior (Tomlinson y otros, 2001).

La Formación Cerro Empexa se habría depositado en un ambiente continental volcano-sedimentario similar al arco actual de la cordillera de los Andes (Masterman, 2003). Vergara y Thomas (1984) dividen la Formación en dos miembros: un miembro inferior de carácter volcano-sedimentario conformado por conglomerados, areniscas, fangolitas y brechas, que aflora principalmente al norte del cerro Empexa y al sur de la quebrada Rosario; y un miembro superior de carácter volcánico, constituido por andesitas brechosas, brechas tobáceas, tobas líticas y andesitas porfídicas. Un nivel de ignimbrita intercalado en el miembro inferior en quebrada Rosario fue datado mediante U-Pb en circón por Tomlinson y otros (2001) y obtuvo edad Maastrichtiano. Dataciones en tobas riolíticas y otra en lavas andesíticas mediante el método K-Ar en roca total, definen la edad de la Formación Cerro Empexa como Cretácico Superior (Campaniano) (AURUM, 2009).

2.2.1.4. Ignimbrita Huasco

Corresponde a secuencias piroclásticas dacíticas a riolíticas asociadas a calderas de colapso del Mioceno inferior-medio. Se compone por tobas, total o parcialmente soldadas, una parte media de tobas riolíticas compactas muy soldadas, y un nivel superior de color gris claro parcialmente soldadas. Las dataciones de K-Ar en biotita indican una edad Mioceno medio que fluctúa entre $14,4 \pm 0,4$ Ma y $17,1 \pm 0,8$ Ma (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.1.5. Ignimbrita Ujina

Corresponde a un depósito ignimbítico constituido por tobas soldadas que incluyen en ocasiones lentes de material piroclástico, distinguiéndose ocasionalmente estructuras de flujo (Vergara, 1978). Aflora en la localidad de Ujina y en las cabeceras del río Loa (AURUM, 2009). Dataciones

de K-Ar determinan una edad Mioceno superior, específicamente 9.3 ± 0.4 Ma para esta unidad (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.1.6. Depósitos Aterrazados

Los depósitos aterrazados del Distrito están conformados por gravas y arenas polimícticas, y en menor medida tobas dacíticas. En sectores cercanos a zonas de alteración hidrotermal, un gran porcentaje de sus constituyentes son rocas alteradas y mineralizadas con sulfuros, en cuanto a la matriz aparece cementada fundamentalmente por silicatos de cobre, conformando depósitos de minerales exóticos. Sobreyacen a las unidades del Mioceno e infrayacen a depósitos clásticos no consolidados del Reciente (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.1.7. Estratovolcanes

Las estructuras volcánicas del Mioceno superior al Reciente están representadas por estratovolcanes, domos y flujos de lava de composición andesítica y dacítica (Vergara, 1978). Se presentan con distinto grado de conservación, donde los más antiguos presentan conos fuertemente erodados y núcleos expuestos, aunque la gran mayoría se caracteriza por tener conos relativamente bien preservados y sus cráteres moderadamente erosionados (Vergara y Thomas, 1984). Las unidades volcánicas se componen principalmente de andesitas y dacitas en volúmenes aproximadamente equivalentes. Algunos centros asignados al Mioceno superior-Plioceno están cubiertos por depósitos ignimbríticos más recientes (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.1.8. Ignimbrita Pastillos

Corresponde a una secuencia de ignimbritas y depósitos cineríticos, se divide en dos miembros: un miembro inferior constituido por tobas parcialmente soldadas y depósitos laháricos, y un miembro superior correspondiente a tobas cineríticas no soldadas, en la cuenca del Salar de Coposa hay incluidos en la unidad superior, niveles de arcillolitas, limos y diatomitas (Vergara y Thomas, 1984). La edad asignada por Vergara y Thomas (1984) es Pleistoceno medio, de igual forma que la datación realizada en diatomitas por Stoertz y Ericksen, (1974).

2.2.1.9. Depósitos No Consolidados

Estos depósitos incluyen las unidades más recientes del Distrito, entre ellas se encuentran una serie de depósitos salinos, aluviales, de arenas eólicas, cineríticos con costras salinas, y finalmente depósitos aluviales de ceniza y lapilli (Vergara y Thomas, 1984).

2.2.2. Rocas Intrusivas

La composición de los cuerpos intrusivos presentes en el área varía su composición, pudiéndose encontrar dioritas, monzonitas, granodioritas a granitos (Münchmeyer y otros, 1984). En el distrito destacan tres periodos de emplazamiento de intrusivos, el primero ocurrido durante el Pérmico-Triásico corresponden a granitos y granodioritas restringidos a la Formación Collahuasi, y asociados al pórfido de nombre homónimo. El segundo representado por dioritas cuarcíferas y granodioritas del Cretácico Superior-Paleógeno inferior que intruyen a las formaciones Cerro Empexa, Quehuita y Collahuasi (Münchmeyer y otros, 1984; Vergara y Thomas, 1984). De forma más tardía se emplazan intrusiones cuarzo-monzoníticas en la Formación Collahuasi durante el período Eoceno superior-Oligoceno inferior, este último evento se relaciona a la génesis de los pórfidos cupríferos de Rosario y Ujina (Münchmeyer y otros, 1984).

Datos más recientes de U-Pb en circón, aportados por Maksaev y otros (2009) revelan edades de cristalización de 35 a 36 Ma para los pórfidos de los depósitos Rosario, Rosario Oeste y Ujina, en cambio la actividad magmática del depósito Quebrada Blanca se inició un poco antes (37 Ma), pero las edades de U-Pb en circón para los pórfidos tardíos de Quebrada Blanca son contemporáneos a los depósitos Rosario y Ujina. Por lo tanto, se identifican al menos dos eventos de intrusión de pórfido para estos yacimientos. En Rosario y Rosario Oeste se identifica una sobreimposición hidrotermal de alta sulfuración, que según datos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se produjo entre los 28 y 33 Ma (Masterman y otros, 2004).

2.2.3. Estructuras

El distrito Collahuasi se encuentra localizado dentro de un bloque estructural que constituye un *horst*, este bloque tiene 30 km de elongación en dirección N-S, y 40 km de ancho (Bisso y otros, 1998). La dinámica estructural del distrito está dominada por sistemas de fallas del Cenozoico de

orientaciones NNW-SSE, NE-SW, NW-SE y N-S (Münchmeyer y otros, 1984). Dentro de las fallas NNW-SSE, las más relevantes son la Falla Oeste y la Falla Loa (Figura 2.3). La Falla Oeste, conforma el flanco oeste del distrito, separando las sedimentitas del Jurásico yacientes en su flanco oeste, de los depósitos volcánicos y batolitos graníticos de edad Permo-Triásico presentes en su flanco este. La Falla Loa, forma el borde este del *horst*, en la vecindad del Salar de Michincha (Bisso y otros, 1998).

Los sistemas conjugados NE-SW y NW-SE están presentes en los yacimientos Rosario y Ujina, para estos se han reconocido movimientos de rumbo sinestrales como dirección predominante de movimiento, con un máximo desplazamiento estimado de entre 1 y 1,5 km (Münchmeyer y otros, 1984). Estos desplazamientos son los que estarían asociados a la actividad intrusiva del Paleógeno, y, por ende, a la formación de los pórfidos cupríferos de Quebrada Blanca, Rosario y Ujina (Bisso y otros, 1998). Un tercer sistema estructural de rumbo NW-SE llamado de manera informal “Sistema Collahuasi”, es interpretado como un fallamiento antiguo y profundo, y es reconocible desde Ujina por el sur hasta Characolla por el norte (Sanhueza y otros, 2006 en Garay (2021).

Los depósitos de Capella y Quebrada Blanca se asocian a estructuras subsidiarias del Sistema de Falla Oeste, el yacimiento Ujina se relaciona a estructuras secundarias del Sistema Falla El Loa, y el depósito Rosario a una zona de traspaso estructural entre ambos sistemas (CMDIC, 2014).

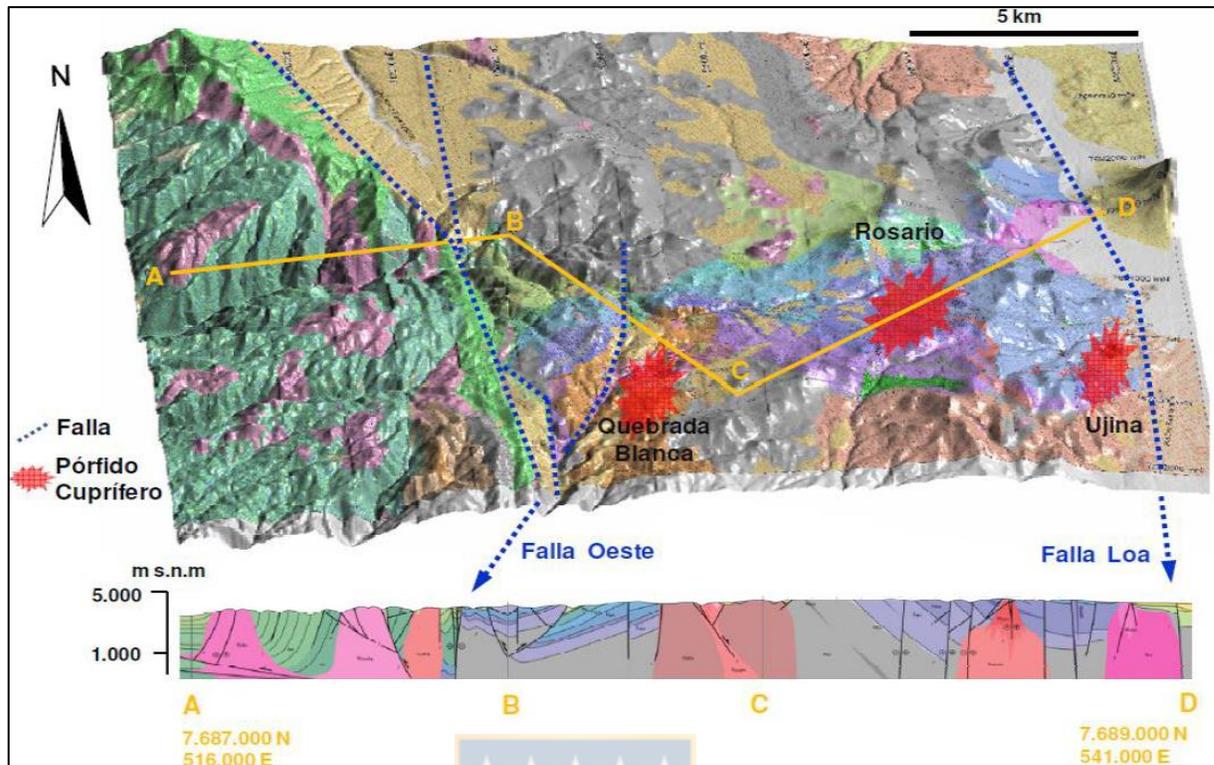


Figura 2.3. Mapa y perfil estructural del Distrito Collahuasi. Extraído de Ireland, (2010).

2.3. Geología del Yacimiento Rosario

En este capítulo se describe la geología del yacimiento Rosario y se presenta un breve análisis del entorno estructural. La roca huésped del yacimiento Rosario está compuesta de una secuencia de rocas volcánicas ácidas y andesitas con intercalaciones de rocas sedimentarias, pertenecientes a la Formación Collahuasi de edad Pérmico-Triásico. Previo al emplazamiento del pórfido Rosario, esta secuencia fue intruida por el pórfido Collahuasi, que corresponde a una granodiorita de edad triásica (Masterman, 2003).

El pórfido Rosario se describe como una monzonita cuarcífera, es el último evento de intrusión en el distrito con edad aproximada de 33 Ma, cuyo emplazamiento está asociado a las estructuras en el área. Este sistema muestra movimientos normales y dextrales (Camus, 2003).

En el yacimiento la mineralización primaria se observa en el fondo mina, la cual presenta zonación que en los bordes forma un halo de baja ley con una alta concentración de pirita y baja calcopirita, donde esta última se incrementa en cantidad hacia el centro, además de la aparición de núcleos de

bornita con digenita, junto al molibdeno, aumentando la ley de cobre (Masterman, 2003). Sobreimpuesto a los sistemas de desarrollo temprano, hay sistemas de vetas de alta sulfuración que poseen bornita, calcosina y enargita, con contenidos menores de calcopirita y tetraedrita-tenantita (Dick y otros, 1994; Masterman, 2003).

2.3.1. Litología

Para Rosario se han definido litologías informales, y se han agrupado según relaciones genéticas y distribución espacial en el yacimiento (Figura 2.4 y Figura 2.5), las definiciones han sido extraídas del informe de procedimiento de mapeo de sondajes geológico CMDIC (2015).

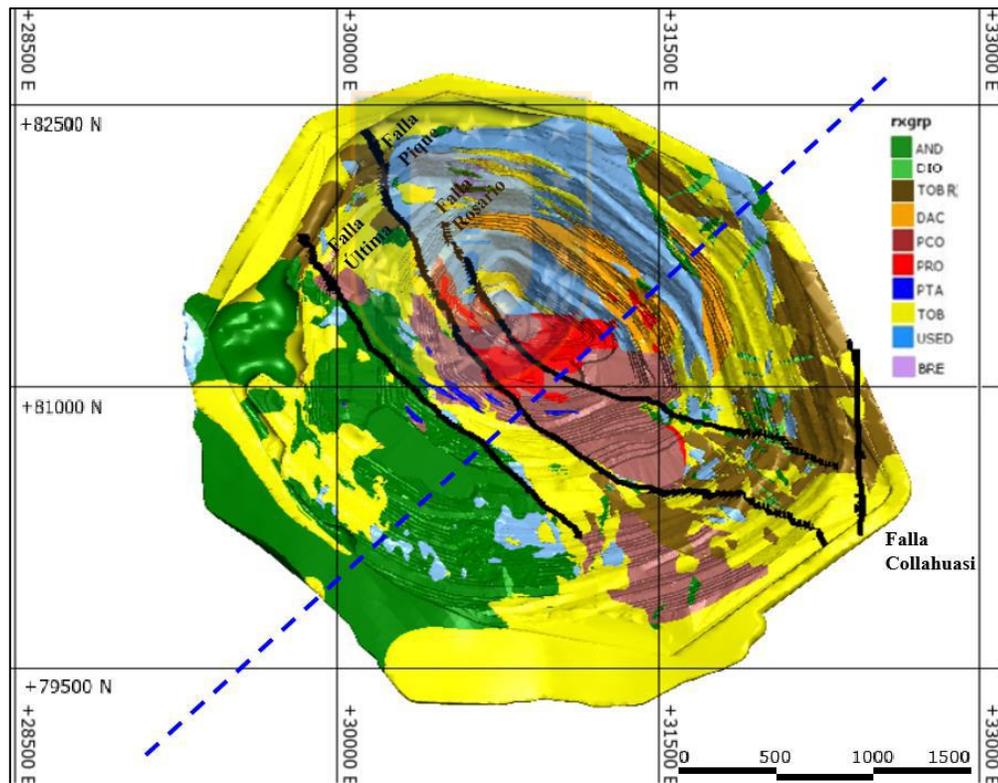


Figura 2.4. Modelo litológico en planta de pit Rosario. Realizado en LeapfrogGeo, extraído de Garay (2021).

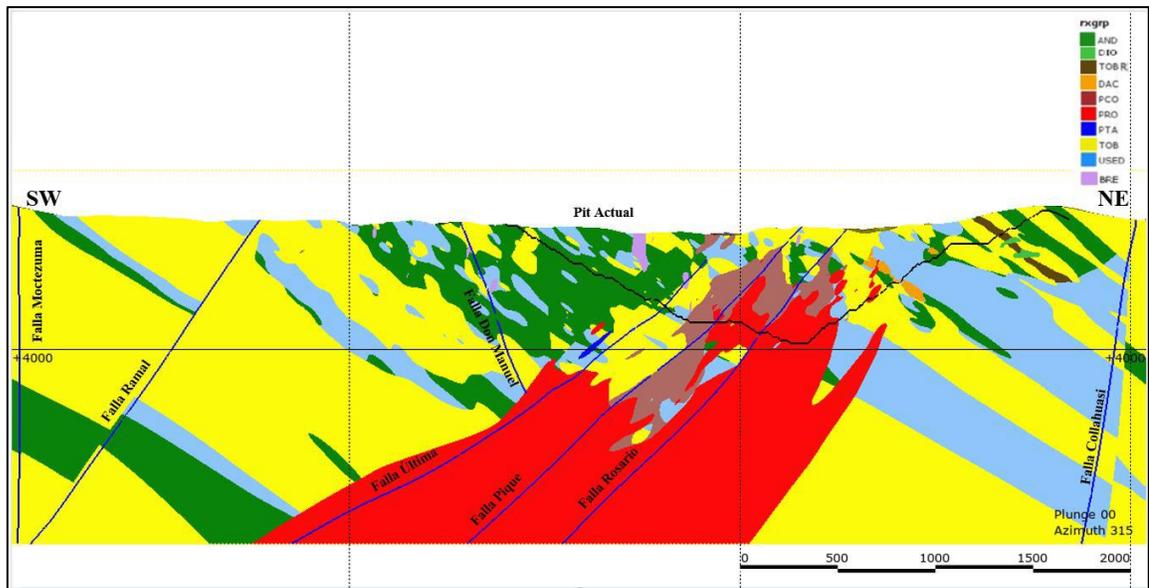


Figura 2.5. Perfil litológico de pit Rosario. Realizado en LeapfrogGeo, extraído de Garay (2021).

2.3.1.1. Andesita (AND)

Corresponde a rocas volcánicas de composición andesítica y basáltica con variadas texturas, que van desde texturas porfídicas gruesas (ocoítas), amigdaloidales (re llenas con clorita), afaníticas y brechizadas. La mineralogía se caracteriza por presentar piroxeno, olivino subordinado y fenocristales de plagioclasa, con alteraciones a epidota, clorita y calcita.

2.3.1.2. Dacita (DAC)

Corresponde a rocas volcánicas de composición dacítica a riolítica, incluye dacitas, riolitas, y riolitas, presentan textura fluidal o levemente brechosa. En general, es una roca ígnea volcánica, de textura microcristalina o porfídica, constituida por fenocristales de feldespato, plagioclasas (principalmente sódica: oligoclasa, andesina) y ojos de cuarzo, en su mayoría corroídos en sus bordes, inmersos en una masa fundamental felsosídica y afanítica.

2.3.1.3. Toba (TOB)

Corresponde a rocas volcanoclásticas de composición dacíticas a riolíticas, incluyen tobas líticas, vítreas y cristalinas, en algunos sectores del yacimiento se observa mayor contenido de sílice, generando tobas soldadas. Se caracterizan por mostrar ojos de cuarzo con “embahiamiento”, presencia de vidrio y fragmentación de los cristales, tanto de cuarzo como de plagioclasa.

2.3.1.4. Toba Roja (TOBR)

Corresponde a rocas piroclásticas de composición dacíticas a riolíticas. Pueden ser tanto vítreas, cristalinas, así como líticas. Se diferencian de las tobas (TOB) porque presentan un color rojizo y afloran en menor proporción.

2.3.1.5. Unidad Sedimentaria (USED)

Corresponde a una unidad que agrupa a rocas sedimentarias volcanogénicas (SV) y carbonatadas (SC). Las SV se observan gradadas y grano soportadas, con abundantes líticos y/o cristales de plagioclasa. Los clastos son redondeados a subangulosos, y tienen tamaños desde 1mm a 2 cm, las rocas más comunes son conglomerados, brechas, areniscas gradadas e intercalaciones de lutitas. Las SC son masivas con dominios laminados menores que pueden presentar hasta 30% de Qz fino y arcilla como accesorio. En contacto con el pórfido Rosario pueden generar hornfels o skarn con granate, diópsido, actinolita, epidota, clorita y magnetita.

2.3.1.6. Pórfido Collahuasi (PCO)

Corresponde a un pórfido de composición granítica con textura de grano grueso, con masa fundamental menor al 40%, localmente puede encontrarse fanerítico. Está compuesto por fenocristales de plagioclasa, feldespato potásico, biotita y cuarzo. Se identifican ojos de cuarzo de hasta 1 cm de diámetro y en proporción superior a 20%. Este pórfido tiene más cuarzo que el pórfido Rosario, y los máficos se caracterizan por un crecimiento intersticial entre los otros minerales.

2.3.1.7. Pórfido Rosario (PRO)

Corresponde a un pórfido de composición granodiorítica-monzonítica de grano medio a fino. Los fenocristales predominantes son plagioclasa y cuarzo, este último en proporción menor al 15% y de tamaño menor a 0,5 cm. Presenta máficos de biotita y hornblenda. La masa fundamental, a diferencia del pórfido Collahuasi, es mayor a 50%.

2.3.1.8. Diorita y Pórfido Diorítico (DIO)

Esta unidad presenta textura hipidiomórfica inequigranular con cristales de plagioclasa fuertemente alterados y cristales anhedrales de cuarzo intersticiales entre las plagioclasas, la textura también puede variar de fanerítica a porfídica. Usualmente forman diques o pequeños stocks.

2.3.1.9. Brechas Hidrotermales (BRH)

Localmente en el yacimiento Rosario se han observado brechas hidrotermales compuestas por varios cementos, como turmalina, cuarzo, calcopirita, pirita, especularita, los fenocristales son angulosos a subredondeados, monomícticos a polimícticos. Presenta mineralización de sulfuros. Las brechas de polvo de roca (BXPR) han sido reconocidas también tipo *pebbles dikes* y sin mineralización.

2.3.2.10. Brecha Ígnea (BRI)

Limitada en el contacto del pórfido Rosario con la roca de caja, corresponde a una brecha con fragmentos de rocas de origen intrusivo, generalmente pórfidos, en una matriz ígnea (cuarzo, feldespato y biotita).

2.3.2. Alteraciones

Las alteraciones en el yacimiento Rosario se dividen en alteraciones tempranas, tardías y otras, según la asociación mineral y distribución espacial (Figura 2.6 y Figura 2.7), de acuerdo con el procedimiento de mapeo de sondajes geológico de CMDIC (2015).

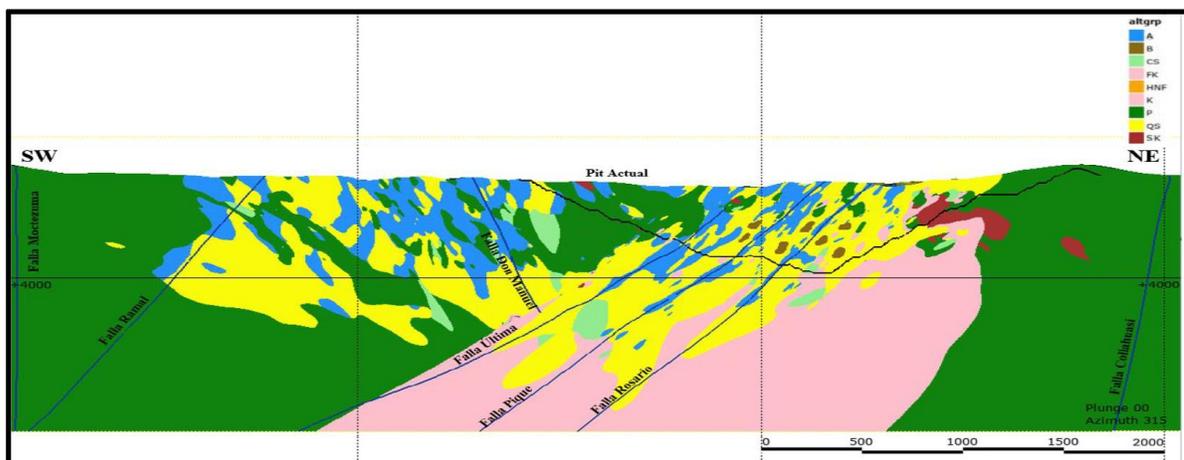


Figura 2.6. Perfil de alteración en pit Rosario. Realizado en LeapfrogGeo, extraído de Garay (2021).

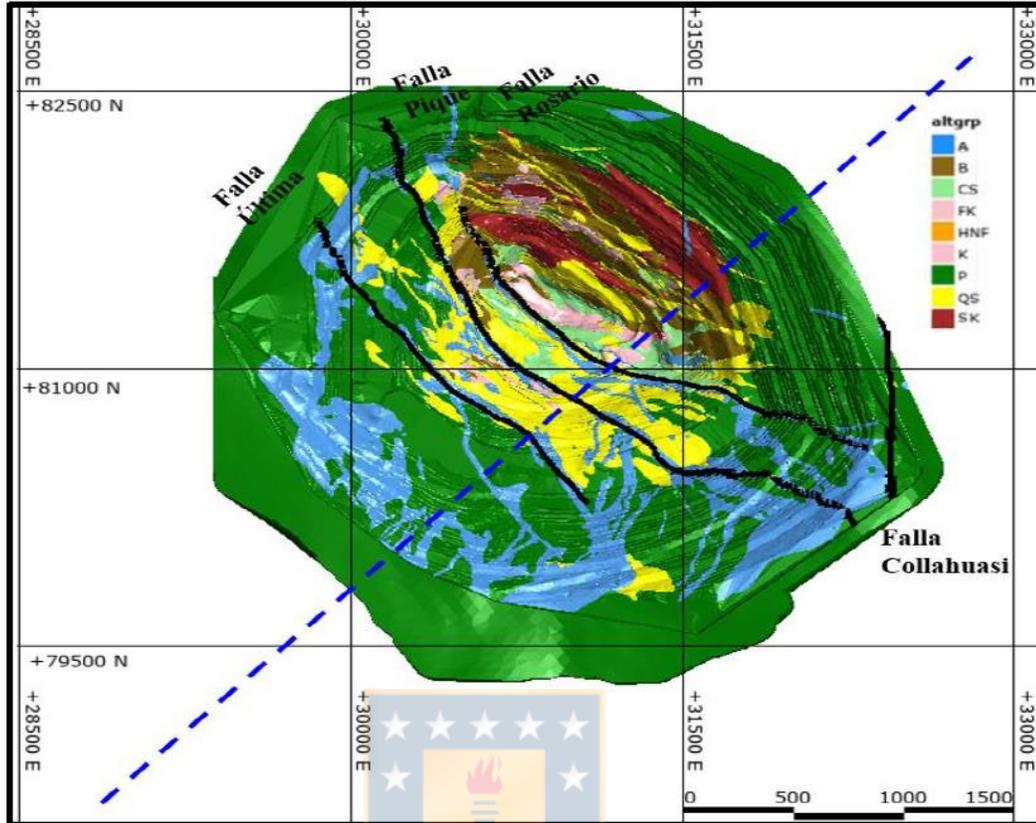


Figura 2.7. Modelo de alteración en planta de pit Rosario. Realizado en LeapfrogGeo, extraído de Garay (2021).

2.3.2.1. Alteraciones Tempranas

Incluye las alteraciones potásicas, propilítica y clorita-sericita, que en ocasiones son obliteradas producto de la sobreimposición de las alteraciones tardías pervasivas (CMDIC, 2015).

A. Potásica (K)

Esta alteración se desarrolla a altas temperaturas (entre 400 y 800° C), en las etapas tempranas de alteración (fase tardiomagmática), ocupando la zona central de la alteración relacionada al emplazamiento del pórfido. Bisso y otros (1998), diferenciaron dos tipos de alteración potásica, la feldespática (K) y la biotítica (B). La alteración feldespática, se caracteriza por la abundancia de feldespato potásico y cuarzo, con biotita en menor medida. La alteración biotítica se ubica adyacente a la alteración feldespática y se caracteriza por la presencia de una cantidad considerable de biotita, genéticamente relacionada a reacciones de metasomatismo potásico.

B. Propilítica (P)

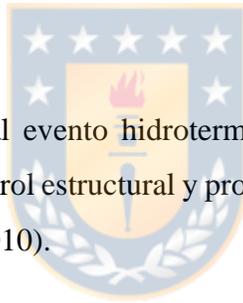
Ocurre a una temperatura menor que la alteración potásica (entre 200°C y 250°C). Se dispone de manera marginal a las zonas de alteración potásica, e implica un bajo grado de hidrólisis en los minerales de las rocas a las que afecta, con bajo grado de metasomatismo catiónico o lixiviación de álcalis. Es característica para esta alteración la asociación clorita-epidota, que le dan una coloración verdosa a la roca y, en algunas ocasiones, la presencia de albita, calcita y pirita, por incorporación de agua, bicarbonato o azufre al sistema (Masterman, 2003).

C. Clorita-Sericita (CS)

Es la alteración primaria más tardía y menos extendida, restringiéndose casi en su totalidad entre las alteraciones potásica y propilítica. Se caracteriza por la asociación sericita como mineral principal y clorita en menor proporción. Podría interpretarse como una etapa de argilización de mediana temperatura (Masterman, 2003).

2.3.2.2. Alteraciones Tardías

Agrupar alteraciones relacionadas al evento hidrotermal principal y a procesos supérgenos. Se caracterizan por tener un mayor control estructural y provocar la obliteración de las texturas previas de litología y alteración (Sillitoe, 2010).



A. Fílica o Cuarzo-Sericita (QS)

Esta alteración se caracteriza por una transformación de los feldespatos (plagioclasa y feldespato alcalino) a sericita (o illita) y cuarzo secundario, en mayor o menor proporción, debido a una hidrólisis moderada. Los minerales antes mencionados, son acompañados por mineralización de pirita. Su control es estructural, afectando principalmente el sector delimitado por las fallas Rosario por el noreste (CMDIC, 2014). Se relaciona al evento principal de mineralización y que oblitera la alteración potásica en gran parte del yacimiento. Esta alteración afecta principalmente al pórfido Rosario y al pórfido Collahuasi, además de las unidades volcánicas de composición más ácida.

B. Argílica (A)

Se caracteriza por presentar alto contenido de arcilla, como caolinita, montmorillonita (esmectita), pirofilita o arcillas indiferenciadas, principalmente reemplazando a plagioclasas y en fracturas.

Puede haber sericita acompañando a las arcillas. Cuando se presenta de manera pervasiva, los máficos se encuentran decolorados (CMDIC, 2015). También concentra a las de carácter supérgeno, originándose posiblemente por la interacción de fluidos meteóricos infiltrados a través de estructuras preexistentes, provocando una lixiviación importante del Ca, Na y Mg presente en las rocas, afectando principalmente a las plagioclasas, generándose caolinita y arcillas del grupo de la esmectita, esta alteración se superpone a la anterior sobre el nivel límite que alcanzan las rocas lixiviadas (Masterman, 2003).

C. Argílica Avanzada (AA)

La alteración argílica avanzada se caracteriza porque gran parte de los minerales son alterados a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. Puede contener cuarzo oqueroso o *vuggy sílica*. Ocurre a condiciones de pH entre 1 y 3.5, si hay bajo pH 2 domina el cuarzo, mientras que alunita ocurre a pH sobre 2. Aunque no contengan cuarzo residual, las asociaciones de halos de vetas conteniendo pirofilita-dikita con o sin alunita puede denominarse argílica avanzada. Agrupa a los sistemas de vetas Cu-As de alta sulfidización. (CMDIC, 2015).

2.3.2.3. Otras Alteraciones

A. Alteración Tipo Skarn

Ocurre por reemplazo metasomático, está caracterizada por la presencia de minerales calcosilicatados faneríticos de grano grueso, de Ca, Fe, Mg y Mn. Reemplazan selectivamente a rocas carbonatadas. La roca huésped es típicamente calcárea, como caliza, dolomita o rocas sedimentarias clásticas calcáreas (CMDIC, 2015). En el yacimiento esta alteración ocurre localmente, donde el pórfido Rosario se encuentra en contacto con rocas de caja calcáreas de la unidad sedimentaria, generando zonas discretas de epidota, granate y sulfuros.

B. Alteración Tipo Horn

Este tipo de alteración se caracteriza por el metamorfismo de contacto entre rocas no carbonatadas y un cuerpo ígneo caliente. En este caso, las rocas no carbonatadas son sedimentos volcanogénicos y andesitas de la Formación Collahuasi y los cuerpos magmáticos del yacimiento. (CMDIC, 2015).

2.3.3. Zona Mineral

De acuerdo con Masterman, (2003) y el procedimiento de mapeo de sondajes (CMDIC, 2015), se identifican 6 zonas minerales principales distribuidos en el yacimiento Rosario (Figura 2.8 y 2.9).

2.3.3.1. Zona Lixiviada (LIX)

Se encuentra en la zona superior del depósito, entre la superficie y el techo de sulfuros. Se caracteriza por la presencia de óxidos de hierro o limonitas derivadas de la oxidación y lixiviación de pirita y sulfuros de cobre.

2.3.3.2. Zona de Óxidos (OXI)

Corresponde a sectores con mineralización de óxidos verdes (crisocola) y negros (“*copper wad*”). Se ubica sobre el techo de sulfuros y bajo la zona lixiviada.

2.3.3.3. Zona Mixta (MIX)

Corresponde a los sectores con mineralización de óxidos y sulfuros simultáneamente. Se ubica entre el cuerpo de lixiviado y el techo de sulfuros. En su gran mayoría son cuerpos por sobre las zonas de los sulfuros secundarios y asociadas a los óxidos, con formas subhorizontales. Tienen una distribución similar a los óxidos, es decir al noreste del sistema de fallas de Rosario y del depósito.

2.3.3.4. Zona Secundaria (SEC)

Corresponde a zonas con presencia de sulfuros de cobre de origen supérgeno, con presencia principalmente de calcosina. Pueden estar controladas por estructuras, y en zonas más profundas se observan en la parte suroeste del yacimiento.

2.3.3.5. Zona Primaria (PRI)

Esta zona agrupa rocas que no están afectadas por los procesos supérgenos. Se ubica en la parte central del depósito, en las zonas más profundas. Las menas características son de origen hipógeno, tales como calcopirita, bornita y digenita.

2.3.3.6. Zona Primaria Pirítica (PRIPY)

Esta zona no se encuentra afectada por procesos secundarios, y representa las partes más distales del sistema pórfido, también llamado halo externo, donde el sulfuro predominante es la pirita, con presencia en trazas de calcopirita.

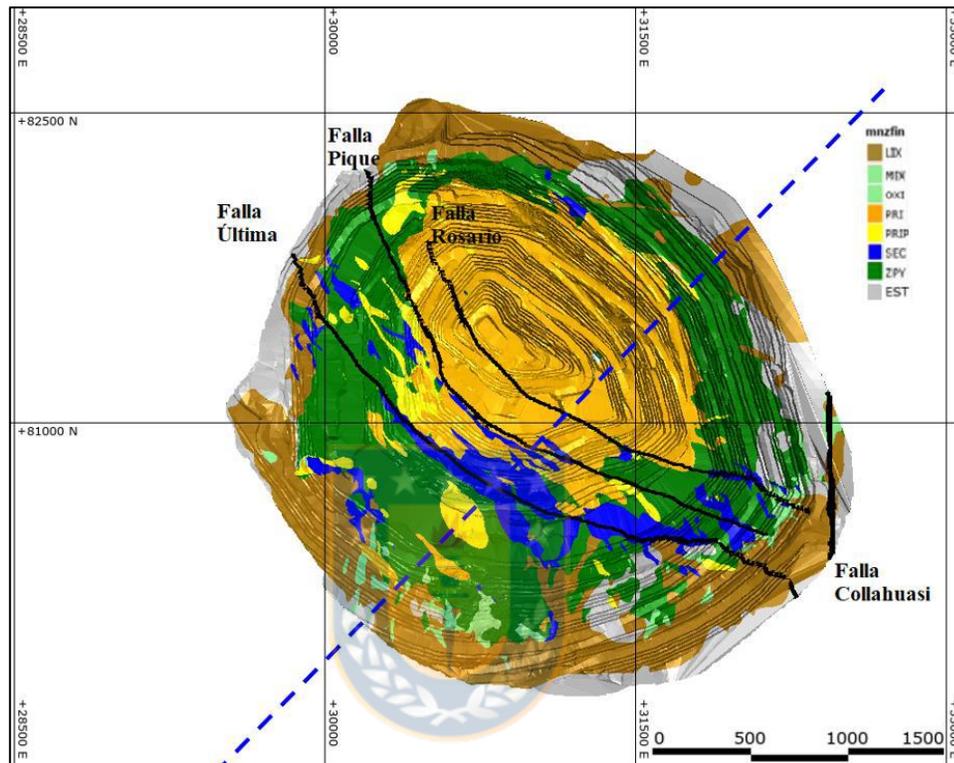


Figura 2.8. Modelo de zona mineral en pit Rosario. Realizado en LeapfrogGeo, extraído de Garay (2021).

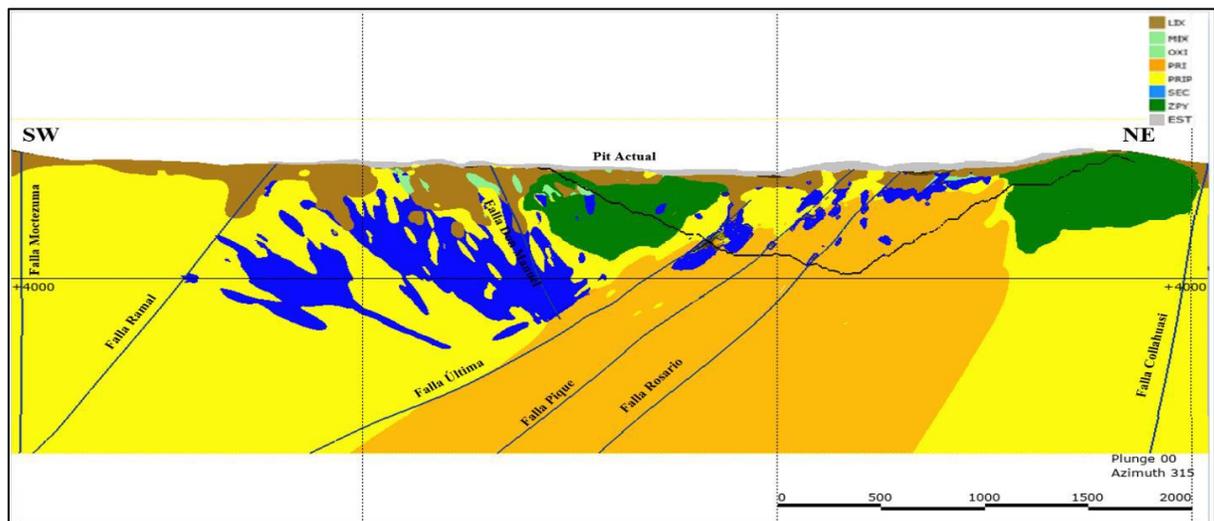


Figura 2.9. Perfil de zona mineral en pit Rosario. Realizado en LeapfrogGeo, extraído de Garay (2021).

2.3.4. Estructuras

El sistema de fallas de Rosario comprende una serie de fallas de moderado a alto ángulo (45° a 65°), de manto suroeste y noreste que han cortado el cuerpo mineralizado de Rosario (Figura 3.7). Estas fallas muestran considerables desviaciones dextrales y sinestras menores (Mastermann, 2003). Dentro de las estructuras que destacan están las fallas Moctezuma, Collahuasi, Chepa, Ramal y las vetas fallas Última, Rosario y Pique (Figura 2.10), las cuales presentan un índice de desplazamiento mayor, y constituyen un rasgo estructural relevante en el yacimiento (CMDIC, 2014). Estas tres últimas se definen por zonas de salbanda continuas en superficie y por separaciones asociadas en los testigos de diamantina. Estas fallas poseen un rumbo entre 30° y 40° al NW, con ángulos de manto hacia el suroeste que varían entre los 30 y 65° (Mastermann y otros, 2005).

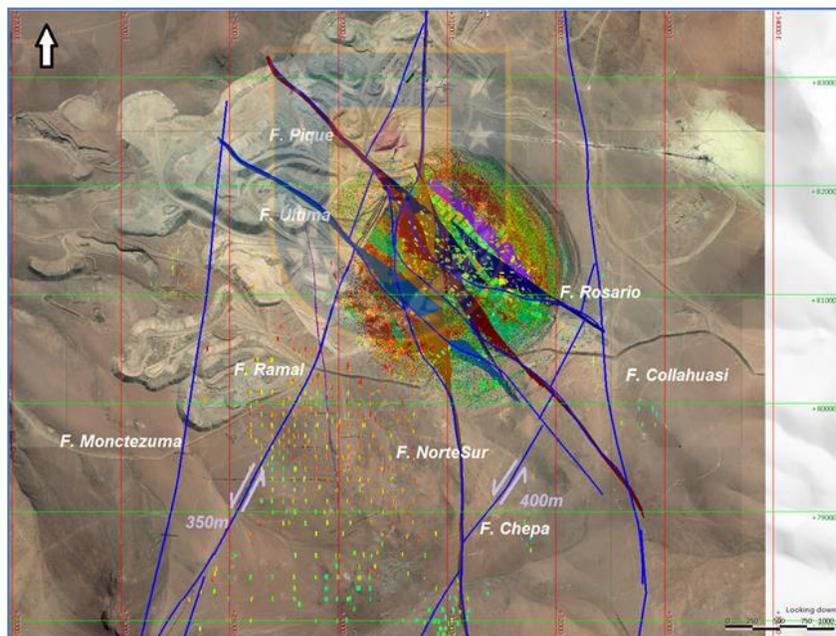


Figura 2.10. Mapa con estructuras principales del yacimiento Rosario. Extraído de Sobarzo (2010)

La Falla Última representa el límite estructural del modelo de Rosario (ambiente pórfido) y Rosario Oeste, este último corresponde a un sistema epitermal de alta sulfidización controlado principalmente por estructuras NNW-SSE y N-S. Por otro lado, al NW de las estructuras, si bien existe una superposición de un evento epitermal, el ambiente dominante es característico de un pórfido cuprífero (CMDIC, 2014).

Además de las fallas principales antes mencionadas, el yacimiento cuenta una serie de fallas menores, las cuales poseen variadas orientaciones que son clasificables por la cantidad de bancos que corta la estructura, como podemos observar en la Figura 2.11 existen las Fallas F1, que tiene una extensión mayor a 6 bancos, Fallas F2 con una extensión de 1 a 6 bancos y otras menores con extensión de hasta 2 bancos, estas últimas no están representadas en la imagen para poder visualizar de mejor manera las fallas mayores.

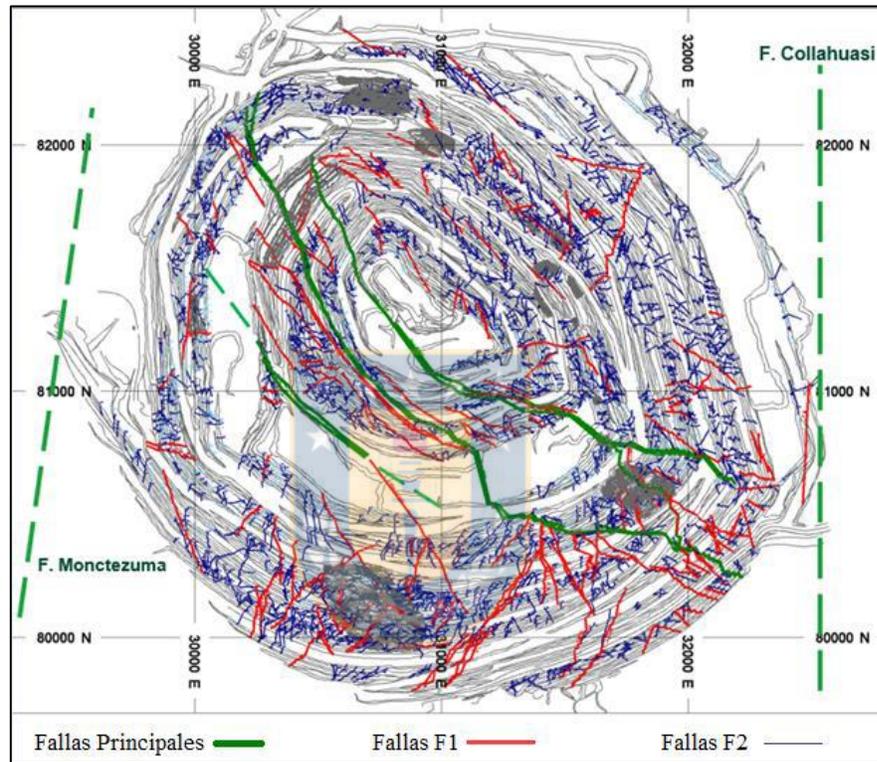


Figura 2.11. Rajo Rosario con estructuras según su persistencia. Extraído de Garay (2021).

En el yacimiento se observan también estructuras a nivel de roca, estas corresponden a vetillas que pueden ser de diferentes tipos, debido a que en estos depósitos existen varias fases de intrusiones. Los tipos de vetillas se pueden clasificar según la etapa del sistema hidrotermal, pudiendo ser: tardimagmática, tardimagmática transicional, hidrotermal temprana, hidrotermal principal e hidrotermal tardía (Sillitoe, 2010).

3. ARSÉNICO

3.1. Antecedentes del Arsénico

El arsénico (As) es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza, su abundancia media en la corteza superior es de 4.8 mg kg⁻¹ (Rudnick y Gao, 2003). El As presente en el medioambiente proviene de fuentes naturales, y generalmente asociadas a procesos geológicos, como la meteorización a partir de rocas parentales o las emisiones volcánicas (Bundschuh y otros, 2008).

El arsénico químicamente posee diferentes estados de oxidación, como arseniato As (V), arsenito As (III), arsénico As elemental (0) y arseniuro As (-III) (Tsai y otros, 2009), cuando se encuentra en formas solubles, es decir como As (III) y As (V), es tóxico para los organismos vivos, también puede encontrarse en formas insolubles, como, por ejemplo, en combinación con un mineral que contenga sulfuro y hierro (Santini y otros, 2000). Entre los minerales que pueden contener arsénico (Figura 3.1) se encuentra la piritita arsénica [Fe(S,As)₂], la arsenopiritita (FeAsS), el rejalgar (AsS), el oropimente (As₂S₃), la cobaltita (CoAsS), la niquelita (NiAs) y la escorodita (FeAsO₄·2H₂O), también se presenta en algunos sulfuros complejos, como la enargita (Cu₃As₄) y la tennantita (Cu,Fe)₁₂As₄S₁₃, siendo estos últimos de gran importancia en el área de estudio ya que contienen cobre. La enargita está principalmente asociada a depósitos del tipo epitermales de alta sulfidación que podrían relacionarse a sistemas de mineralización de pórfidos (Sillitoe, 2010).

Mineral	Composición	Ocurrencia
Arsénico Nativo	As	Vetas hidrotermales
Niquelina	NiAs	Depósitos de vetas y noritas
Rejalgar	AsS	Depósitos de vetas, a menudo asociados con oropimente, arcillas, calizas, también depósitos de hot springs
Oropimente	As ₂ S ₃	Vetas hidrotermales, hot springs, producto de sublimación volcánica
Cobaltita	CoAsS	Depósitos de alta temperatura, rocas metamórficas
Arsenopiritita	FeAsS	Mineral más abundante con As, dominante en vetas minerales
Tennantita	(Cu,Fe) ₁₂ As ₄ S ₁₃	Vetas hidrotermales
Enargita	Cu ₃ As ₄	Vetas hidrotermales
Arsenolita	As ₂ O ₃	Mineral secundario formado por oxidación de arsenopiritita, arsénico nativo y otros minerales de arsénico
Claudetita	As ₂ O ₃	Mineral secundario formado por oxidación de rejalgar, arsenopiritita y otros minerales de arsénico
Scorodita	FeAsO ₄ ·2H ₂ O	Mineral secundario
Ambergita	(Ni,Co) ₃ (AsO ₄) ₂ ·8H ₂ O	Mineral secundario
Hoernesita	Mg ₃ (AsO ₄) ₂ ·8H ₂ O	Mineral secundario, desechos de fundición
Haematolita	(Mn,Mg) ₄ Al(AsO ₄)(OH) ₃	Mineral secundario
Conicalcita	CaCu(AsO ₄)(OH)	Mineral secundario
Farmacosiderita	Fe ₃ (AsO ₄) ₂ (OH) ₃ ·5H ₂ O	Producto de la oxidación de arsenopiritita y otros minerales de arsénico

Figura 3.1. Minerales que contienen arsénico y su ocurrencia. Extraído de Bundschuh y otros (2008).

Según Smedley y otros (2002) y Bundschuh y otros (2008) el arsénico en las rocas presenta valores variados y con distintos promedios (Figura 3.2):

Roca	Concentración de As promedio o rango (ppm)
Rocas Ígneas	
Rocas Ultrabásicas (peridotita, dunita, kimberlita, etc)	1.5 (0.03–15.8)
Rocas Básicas (basalto)	2.3 (0.18–113)
Rocas Básicas (gabro, diabasa)	1.5 (0.06–28)
Rocas Intermedias (andesita, traquita, latita)	2.7 (0.5–5.8)
Rocas Intermedias (diorita, granodiorita, sienita)	1.0 (0.09–13.4)
Rocas Ácidas (riolita)	4.3 (3.2–5.4)
Rocas Ácidas (granito, aplita)	1.3 (0.2–15)
Obsidianas	1.7 (0.5–3.3)
Vidrios Volcánicos	5.9 (2.2–12.2)
Rocas Metamórficas	
Cuarzita	5.5 (2.2–7.6)
Hornfels	5.5 (0.7–11)
Filita/Pizarra	18 (0.5–143)
Esquisto/Gneiss	1.1 (<0.1–18.5)
Anfibolita	6.3 (0.4–45)
Rocas Sedimentarias	
Lutitas marinas /Fangolitas	3–15 (hasta 490)
Fangolitas (ridge Mid-Atlántico)	174 (48–361)
Lutitas no marinas/Fangolitas	3.0–12
Areniscas	4.1 (0.6–120)
Calizas/Dolomitas	2.6 (0.1–20.1)
Fosforita	21 (0.4–188)
Formaciones de hierro y sedimentos ricos en hierro	1–2900
Evaporitas (Yeso/Anhidrita)	3.5 (0.1–10)
Carbones	0.3–35,000
Lutitas Bituminosas (Kupferschiefer, Germany)	100–900

Figura 3.2. Concentración promedio en partes por millón (ppm) de arsénico en rocas. Extraído de Smedley y otros (2002) y Bundschuh y otros (2008).

Los minerales que contienen arsénico en su estructura corresponden a sulfuros que han sido reconocidos en la mayoría de los sistemas hidrotermales, por ejemplo, en los pórfidos de cobre. En este tipo de depósito, el arsénico se concentra preferentemente en la fase vapor de baja densidad y salinidad, mientras que el cobre se reparte preferentemente en la fase fluida de alta salinidad y densidad. La separación de la fase fluida con la fase vapor ocurre a profundidades del límite de la

transición frágil dúctil para sistemas de pórfido (1-3 km aprox.), que se define como el límite entre el flujo fluidos magmáticos calientes afectado por presión litostática y fluidos meteóricos más fríos afectados por presión hidrostática. Sin embargo, solo se considera que la fase de vapor rica en As puede migrar hacia arriba en el sistema a través de fracturas desarrollada en la corteza superior (Figura 3.3). Esta separación geoquímica entre el Cu-As implica que los sulfuros que contienen cobre precipitan preferencialmente en la parte más profunda del sistema de pórfido, mientras que los sulfuros que contienen As precipitarían en partes más superficiales, frecuentemente en fracturas permeables (Carrizo y otros, 2018). Además, para intentar establecer causas de la mineralización del arsénico hay que considerar que la precipitación de este elemento se ve favorecida en condiciones de pH ácido y por consiguiente condiciones alcalinas tienden a mantener el As en solución. La interacción de soluciones ricas en álcalis con la roca hospedante tenderá a removilizar el As contenido en la roca encajante (Suazo, 2010 en Martínez, 2013).

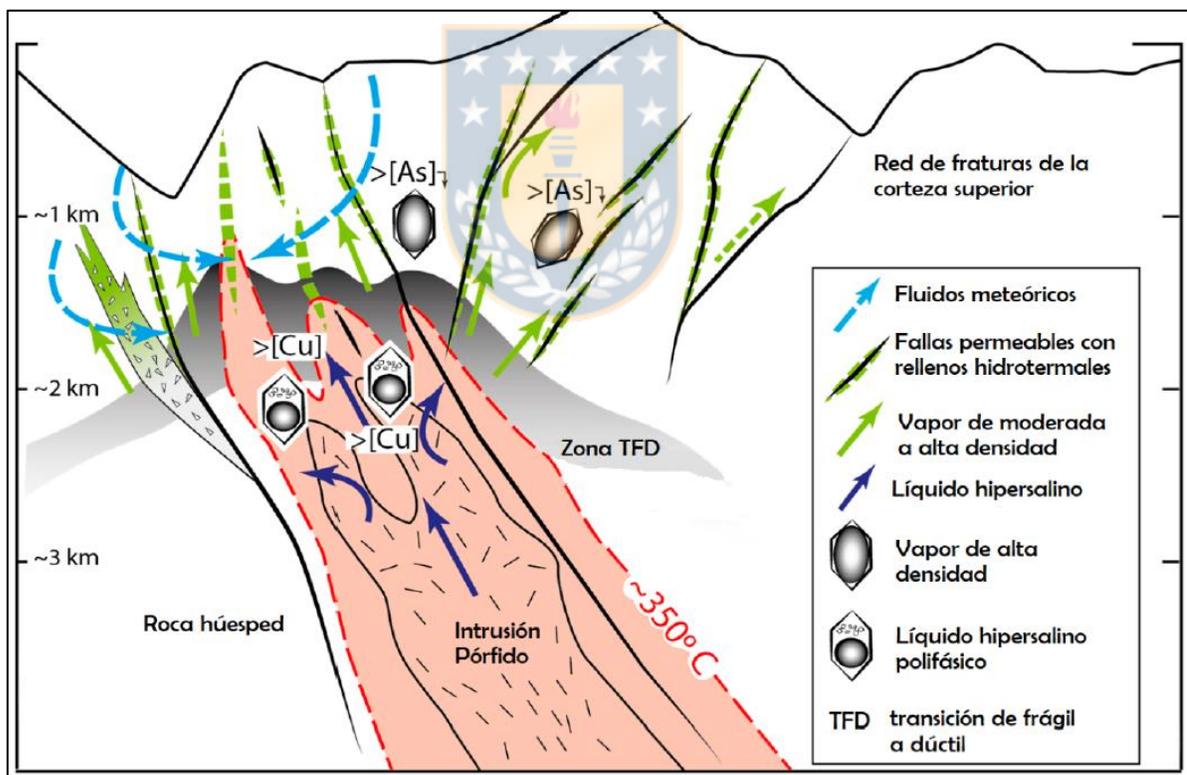


Figura 3.3. Esquema conceptual idealizado de un pórfido de cobre-molibdeno. Representa la separación de fases mineralización-fluido y la distribución del arsénico y cobre. Extraído y modificado de Carrizo y otros (2018).

3.2. Arsénico en el Yacimiento

El yacimiento Rosario es un depósito de tipo pórfido Cu-Mo con superposición epitermal de alta sulfuración, lo que implica que este asociado a grandes cantidades de arsénico. Este elemento está asociado a sistemas de fracturas frágiles de la corteza superior en las etapas tardías de mineralización. Las altas leyes de arsénico se superponen a la mineralización temprana en vetas tardías asociadas a un epitermal de alta sulfidización (Riquelme y otros, 2014).

Las leyes de arsénico están controladas fuertemente por estructuras y zonas de fallas (Riquelme y otros, 2014), esto se ve reflejado en la Figura 3.4, donde se relaciona la distancia de las estructuras con respecto a isoleyes de este elemento. Esto concuerda con el reporte de CMDIC (2015), donde se declaran anomalías de arsénico en las fallas Rosario (entre 5 y 50 ppm), Pique (entre los 10 y 100 ppm) y Última (entre los 50 y 20.000 ppm) como se observa en la Figura 3.5. Garay (2021) reporta que el arsénico percoló en etapas hidrotermales tardías en las Fallas Pique y Última, y parcialmente en la Falla Rosario, todas de orientación NW-SE, y también aprovechó las estructuras heredadas de orientación E-W y N-S para precipitar. Además, Garay (2021) también describe las ocurrencias del arsénico en sondajes, observando principalmente enargita asociada a vetas, fallas, veta-fallas, como masa fundamental en brecha hidrotermal y en vetillas tipo E, mientras que, en zonas lixiviadas señala que es posible encontrar escorodita, este último mineral no se había descrito anteriormente en el yacimiento, por lo que es de total importancia corroborar esta información en este estudio.

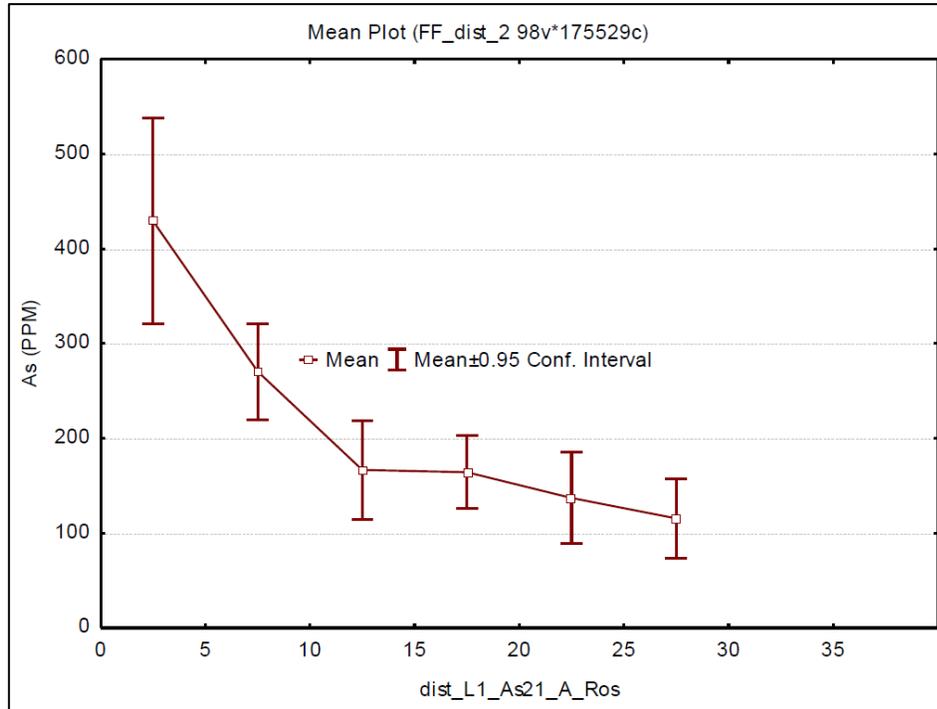


Figura 3.4. Control que ejercen las estructuras sobre la ley de arsénico. En las cercanías de la falla la media de arsénico asciende a ± 400 ppm, mientras que lejos de esta el promedio desciende a ± 100 ppm. Extraído de Riquelme y otros (2014).

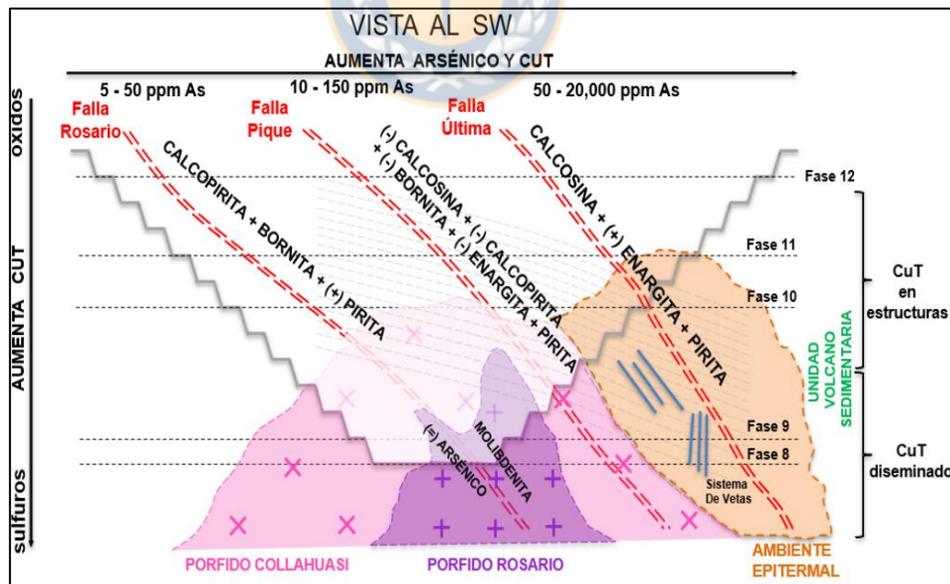


Figura 3.5. Perfil esquemático del yacimiento que muestra concentraciones de arsénico en las tres fallas principales. Extraído de CMDIC (2015).

4. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir de la estadística general del yacimiento y en específico, de las Fases 11 y 13. En estas Fases (Figura 4.1) se extraen muestras, las cuales son observadas de manera macroscópica, y en estas, se realizan cortes pulido-transparentes para estudiar la forma, ocurrencia, asociaciones mineral y texturas de minerales portadores de arsénico en distintos dominios (litología, alteración y zona mineral) del área de estudio, luego de esto, se continúa con análisis QEMSCAN en cada uno de ellos para identificar los minerales de manera cuantitativa, y obtener en mayor detalle el contenido mineral de las muestras extraídas.

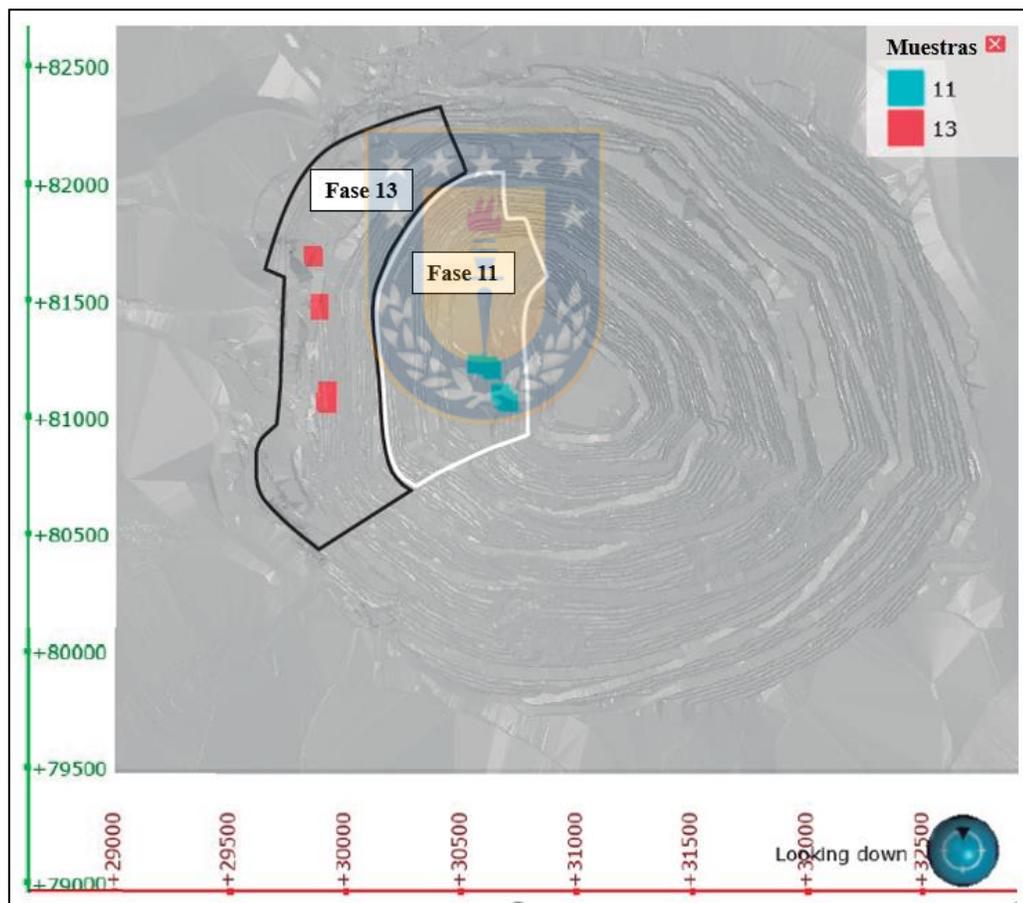


Figura 4.1. Ubicación de Fases 11 y 13 en pit Rosario, y localización de muestras extraídas para el estudio.

4.1. Análisis Bases de Datos de Sondajes

4.1.1. Generalidades

La base de datos de sondajes está conformada por 3.365 sondajes con un total de 939.216,154 m perforados, se utilizan datos de leyes de arsénico, litología, zona mineral y alteración. Esta información es utilizada para hacer estadística en el yacimiento y en el área de estudio, con el fin de visualizar e interpretar la correlación del arsénico en distintos dominios, y su correlación respecto a las distintas fallas principales de la mina.

4.1.2. Estadística del Arsénico

4.1.2.1. Datos Estadísticos del Yacimiento

Se determinan los parámetros estadísticos básicos del arsénico en el yacimiento (Figura 4.2 y 4.3) con ayuda del *software* LeapfrogGeo. Los datos mínimo y máximo son de 2,5 ppm y 75.900 ppm, respectivamente, y debido a que la distribución de concentraciones de As no sigue un patrón normal, la mediana es el valor estadístico más representativo del contenido promedio, siendo esta de 22 ppm de arsénico. La distribución de los datos en rangos ppm se observa en la Figura 4.3, donde se concentra la mayor cantidad de este elemento es entre 0 y 100 ppm, con un 80,24%.

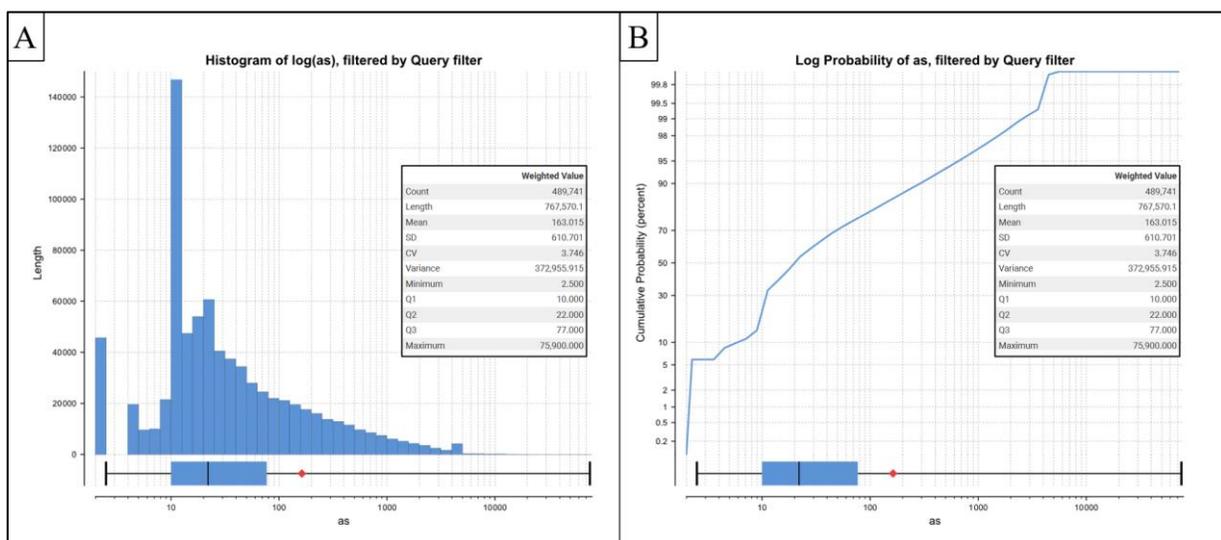


Figura 4.2. Gráficos estadísticos con las concentraciones de arsénico en el yacimiento Rosario junto a diagrama de caja y tabla estadística. (A) Histograma logarítmico de As en ppm. (B) Gráfico de frecuencia acumulada percentil v/s logaritmo de As.

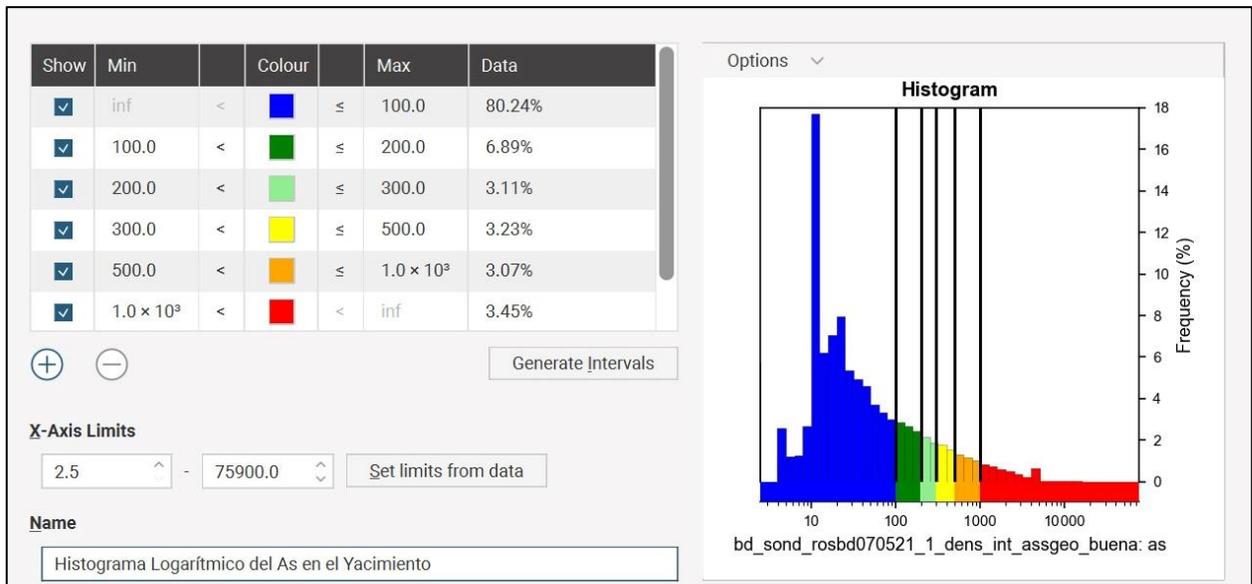


Figura 4.3. Histograma de frecuencia de arsénico junto con tabla con distribución de datos de las concentraciones de As en ppm.

A. Litología

A partir de la Tabla 4.1 y la Figura 4.4 se puede determinar que las litologías del yacimiento con mayor cantidad de arsénico corresponden a brechas (BRE) con una mediana de 45 ppm, les siguen las tobas (TOB) con una mediana de 40 ppm, sin embargo, esta unidad es la que más frecuentemente se encuentra en el yacimiento, por lo que tiene importancia de primer orden. La última litología que tiene contenido mayor a la mediana del yacimiento son las andesitas (AND) con 29 ppm.

Tabla 4.1. Estadística del arsénico en ppm para cada litología presente en Rosario.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
AND	91,309	160.132	487.354	3.043	237,513.782	2.500	14.000	29.000	78.000	15,100.000
BRE	11,937	511.164	1,626.221	3.181	2,644,594.889	2.500	16.000	45.000	290.000	75,900.000
DAC	40,895	105.243	552.839	5.253	305,631.004	2.500	10.000	14.000	40.000	48,000.000
DIO	3,790	89.156	335.627	3.765	112,645.602	2.500	11.000	20.000	36.000	4,000.000
PCO	42,361	85.554	570.778	6.672	325,787.268	2.500	10.000	13.000	34.000	49,000.000
PRO	46,096	63.600	278.160	4.374	77,372.947	2.500	9.000	14.000	32.000	40,200.000
TOB	116,552	228.933	614.793	2.685	377,969.873	2.500	14.000	40.000	171.000	45,252.000
TOBR	2,840	36.550	132.470	3.624	17,548.322	2.500	10.000	14.000	23.000	2,500.000
USED	80,455	121.285	542.742	4.475	294,568.828	2.500	10.000	18.000	49.000	60,400.000

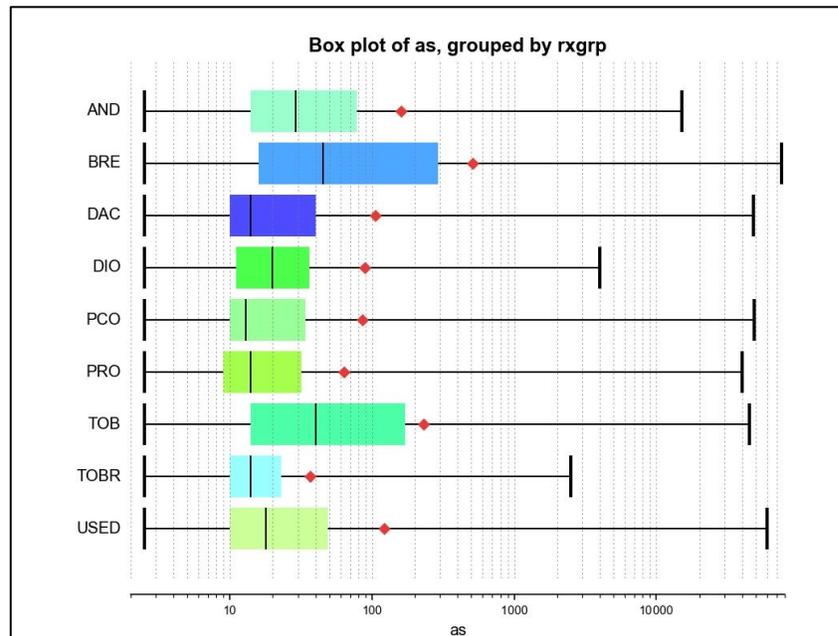


Figura 4.4. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) para cada litología en Rosario.

B. Alteración

A partir de la Tabla 4.2 y la Figura 4.5 se infiere que la alteración que cuenta con una mayor mediana de arsénico del yacimiento es la argílica (A) con 58 ppm, la alteración cuarzo-sericita (QS) también destaca entre las restantes con un valor de 22 ppm. Las demás alteraciones no presentan altos valores de este elemento, mostrando medianas menores a 20 ppm. Esto nos indica que las alteraciones que están directamente relacionadas con el arsénico en el yacimiento son la argílica y la cuarzo-sericita las que, a su vez, son las que más abundan en el yacimiento.

Tabla 4.2. Estadística del arsénico en ppm para las alteraciones principales de Rosario.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
A	130,608	317.525	818.672	2.578	670,223.761	2.500	16.000	58.000	246.000	72,128.000
CS	22,187	39.845	149.876	3.761	22,462.767	2.500	10.000	14.000	27.000	7,834.000
K	6,521	16.124	47.797	2.964	2,284.519	2.500	5.000	10.000	13.000	4,000.000
P	89,485	44.385	137.678	3.102	18,955.247	2.500	10.000	20.000	36.000	7,000.000
QS	144,599	147.628	561.245	3.802	314,995.611	2.500	10.000	22.000	83.000	49,000.000

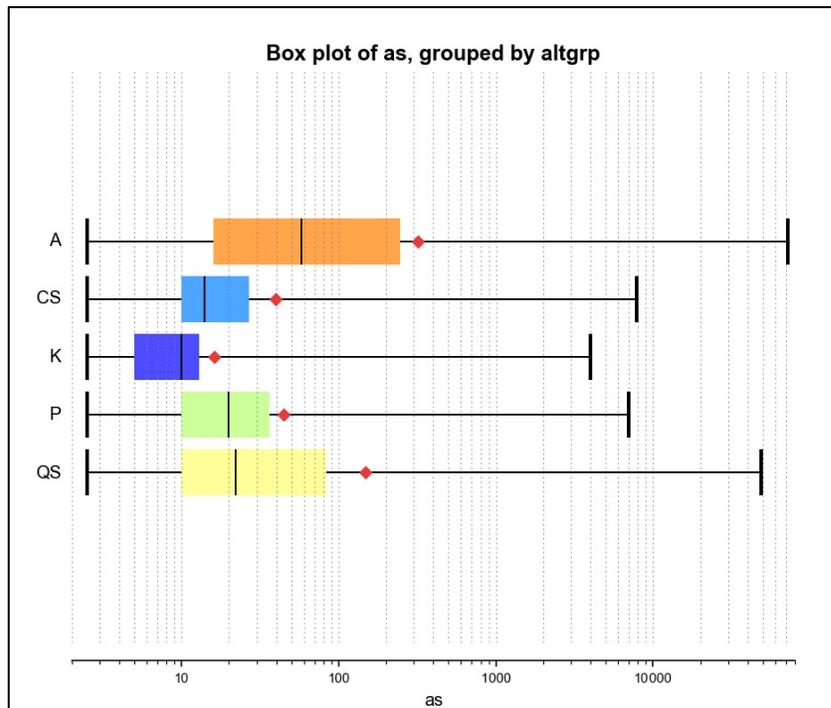


Figura 4.5. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) para alteraciones principales de Rosario.

C. Zona Mineral

De acuerdo a lo que se observa en la Tabla 4.3 y la Figura 4.6 la zona mineral que contiene la mayor mediana corresponde a la zona lixiviada con 144 ppm, otras unidades con una mediana mayor a la del arsénico en el yacimiento corresponden las zonas de sulfuros secundarios, mixtas y óxidos, con valores de 61, 56 y 49 ppm, respectivamente, mientras que las zonas primarias (PRI y PRIPY) tienen contenido bajo los 17 ppm, aunque también pueden poseer anomalías, tal como ocurre en el valor máximo de PRI, con 75.900 ppm.

Tabla 4.3. Estadística del arsénico en ppm para cada zona mineral de Rosario.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
LIX	68,652	484.223	1,016.522	2.099	1,033,316.442	2.500	33.000	144.000	511.000	72,128.000
MIX	8,344	255.786	766.805	2.998	587,990.067	2.500	22.000	56.000	152.000	18,090.000
OXI	10,315	267.519	630.004	2.355	396,904.676	2.500	17.000	49.000	182.000	7,523.000
PRI	125,682	49.239	403.114	8.187	162,501.038	2.500	9.000	10.000	20.000	75,900.000
PRIPY	152,093	44.431	187.173	4.213	35,033.572	2.500	10.000	17.000	32.000	34,729.000
SEC	96,046	214.637	715.754	3.335	512,304.275	2.500	23.000	61.000	159.000	49,000.000

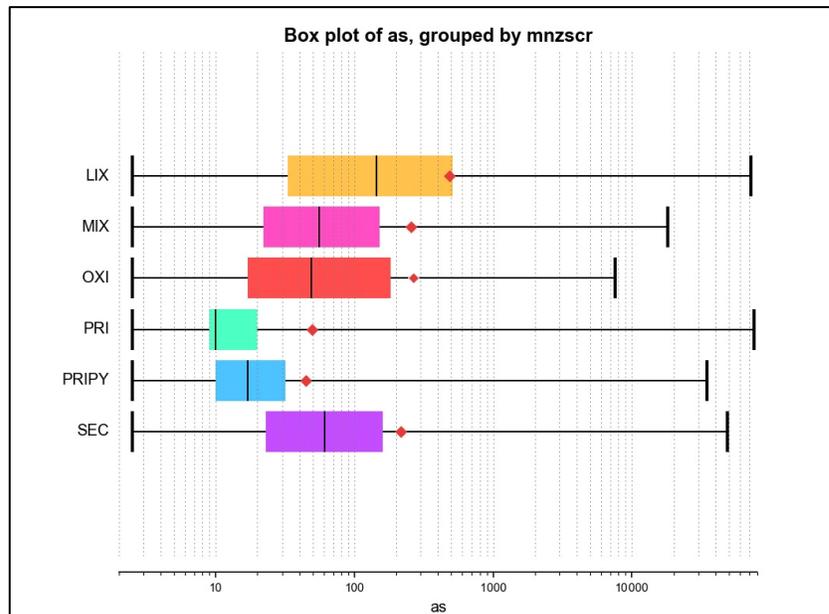


Figura 4.6. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) para zonas minerales de Rosario.

D. Estructuras

Las estructuras están estrechamente relacionadas con altas concentraciones de arsénico, esto se ve reflejado en la Tabla 4.4 y la Figura 4.7, ya que todos los tipos de ocurrencia tienen altos contenidos de este elemento. Destacan las vetas y/o vetillas (VET) con una mediana de 110 ppm, seguida de brechas de falla (BRE) con 49 ppm, luego las fracturas (FRAC) con 30 ppm y por último las fallas (FAL) con 28 ppm. Todas estas se visualizan en proporción, en densidades similares, a excepción de las fallas.

Tabla 4.4. Estadística del arsénico en ppm para estructuras presentes en Rosario.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
BRE	14,320	301.894	720.743	2.387	519,470.681	2.500	19.000	49.000	200.000	15,100.000
FAL	50,155	213.594	605.483	2.835	366,609.726	2.500	12.000	28.000	123.000	16,900.000
FRAC	12,490	168.589	521.385	3.093	271,842.809	2.500	13.000	30.000	116.000	15,100.000
VET	12,824	688.085	1,331.329	1.935	1,772,436.517	2.500	31.000	110.000	648.000	37,500.000

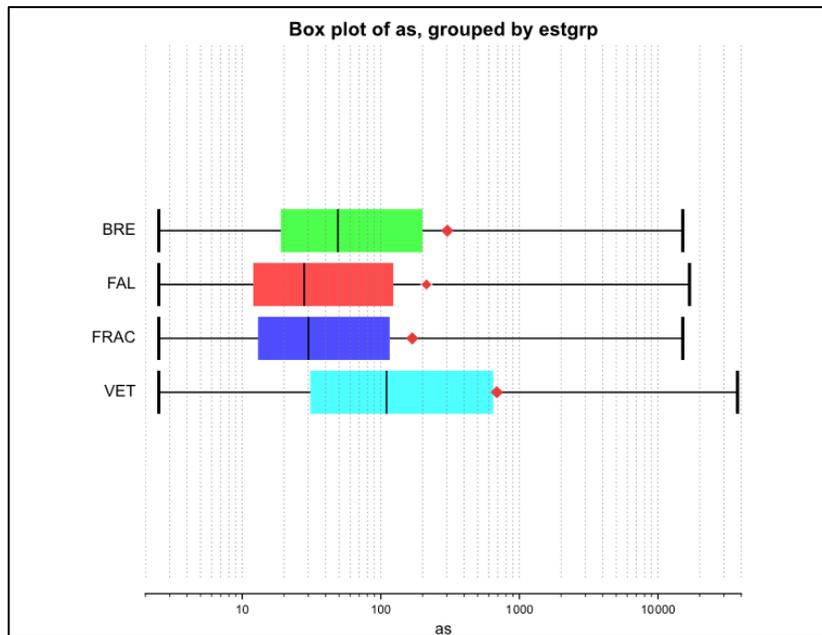


Figura 4.7. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) según estructura en Rosario.

4.1.2.2. Datos Estadísticos del Área de Estudio

Se procede a determinar los mismos parámetros que el Capítulo 4.1.2.1 para el área de estudio, es decir, para las Fases 11 y 13. En la Tabla 4.5 y Figura 4.8 se observa que la Fase 13 tiene mayor contenido de arsénico que la Fase 11, debido a que la media y mediana corresponde a 207 y 30 ppm, respectivamente, mientras que la Fase 11 tiene un promedio de 83 ppm y mediana de 16 ppm.

Tabla 4.5. Estadística del arsénico en ppm según Fase 11 y Fase 13.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
11	6,215	83.201	382.893	4.602	146,607.307	2.500	9.000	16.000	32.000	15,000.000
13	4,633	206.752	637.967	3.086	407,002.474	2.500	12.000	30.000	119.000	15,000.000

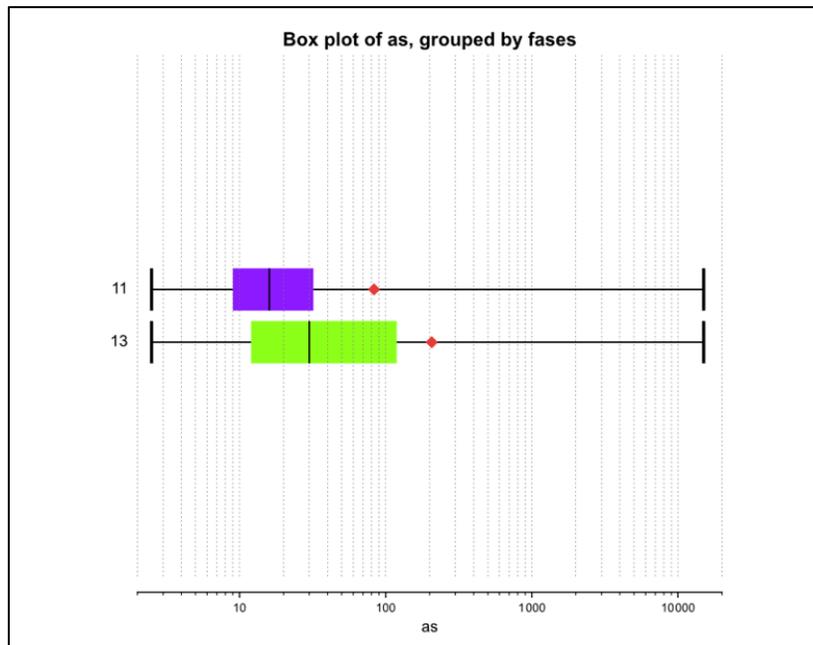


Figura 4.8. Diagrama de caja de concentración de arsénico (ppm) según cada Fase de estudio en yacimiento Rosario.

A. Litología

A partir de la Tabla 4.6 es posible determinar que la Fase 11 tiene altos contenidos de arsénico en las andesitas (AND) y brechas (BRE) principalmente, con medianas de 25 ppm y 24 ppm respectivamente, mientras que las demás unidades no superan los 21 ppm. La principal diferencia de esta Fase con respecto al yacimiento es que la mediana de las brechas, a pesar de ser la segunda litología más alta, está muy por debajo de los 45 ppm de la mediana del yacimiento. En tanto, en la Fase 13 destacan las brechas (BRE), tobas (TOB) y andesitas (AND) con medianas de 134 ppm, 52 ppm y 42 ppm. Todas estas litologías poseen una concentración de arsénico mucho mayor con respecto al yacimiento, lo que indica que en general, que las unidades de esta Fase tienen contenidos anómalos de este elemento.

Tabla 4.6. Estadística del arsénico en ppm según cada litología perteneciente a las Fases 11 y 13 del yacimiento.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
AND	91,309	160.132	487.354	3.043	237,513.782	2.500	14.000	29.000	78.000	15,100.000
11	927	156.706	514.812	3.285	265,031.703	2.500	14.000	25.000	63.000	8,270.000
13	1,178	217.391	507.037	2.332	257,086.550	2.500	18.000	42.000	144.000	4,000.000
BRE	11,937	511.164	1,626.221	3.181	2,644,594.889	2.500	16.000	45.000	290.000	75,900.000
11	84	141.515	434.737	3.072	188,995.917	2.500	10.000	24.000	48.000	2,500.000
13	50	632.257	825.030	1.305	680,675.100	6.000	44.000	134.000	1,123.000	2,811.000
DAC	40,895	105.243	552.839	5.253	305,631.004	2.500	10.000	14.000	40.000	48,000.000
11	143	16.914	34.270	2.026	1,174.452	2.500	5.000	10.000	20.000	379.000
13	107	86.413	218.071	2.524	47,555.108	2.500	12.000	17.000	33.000	1,700.000
DIO	3,790	89.156	335.627	3.765	112,645.602	2.500	11.000	20.000	36.000	4,000.000
11	12	20.307	9.618	0.474	92.507	5.000	14.000	21.000	32.000	35.000
13	15	157.745	446.708	2.832	199,547.724	5.000	9.000	13.000	14.000	1,459.000
PCO	42,361	85.554	570.778	6.672	325,787.268	2.500	10.000	13.000	34.000	49,000.000
11	1,363	54.127	320.428	5.920	102,673.788	2.500	6.000	13.000	26.000	15,000.000
13	786	63.074	191.982	3.044	36,857.246	2.500	10.000	19.000	48.000	2,960.000
PRO	46,096	63.600	278.160	4.374	77,372.947	2.500	9.000	14.000	32.000	40,200.000
11	984	55.230	178.148	3.226	31,736.680	2.500	9.000	13.000	38.000	3,183.000
13	410	76.443	212.915	2.785	45,332.617	2.500	5.000	10.000	32.000	3,410.000
TOB	116,552	228.933	614.793	2.685	377,969.873	2.500	14.000	40.000	171.000	45,252.000
11	1,180	75.738	334.471	4.416	111,871.075	2.500	8.000	17.000	34.000	4,000.000
13	1,131	269.763	566.151	2.099	320,526.897	2.500	16.000	52.000	226.000	4,000.000
TOBR	2,840	36.550	132.470	3.624	17,548.322	2.500	10.000	14.000	23.000	2,500.000
11	8	40.375	60.649	1.502	3,678.268	11.000	15.000	19.000	24.000	190.000
13	38	20.763	16.162	0.778	261.213	5.000	13.000	14.000	21.000	75.000
USED	80,455	121.285	542.742	4.475	294,568.828	2.500	10.000	18.000	49.000	60,400.000
11	1,028	31.910	125.571	3.935	15,768.000	2.500	8.000	13.000	24.000	2,659.000
13	469	80.501	202.439	2.515	40,981.460	2.500	8.000	21.000	59.000	1,961.000

B. Alteración

De la Tabla 4.7 se extrae que las alteraciones, propilitica (P), cuarzo-sericítica (QS) y argílica (A) tienen los valores más altos de mediana de arsénico en la Fase 11, pero todas estas se encuentran por debajo de la mediana del yacimiento, mientras que la Fase 13 posee grandes anomalías de este elemento, incluso mayores a las del yacimiento, específicamente en las alteraciones argílica (A), cuarzo-sericítica (QS) y potásica (P), con medianas de 114 ppm, 41 ppm y 27 ppm respectivamente.

Tabla 4.7. Estadística del arsénico en ppm según cada alteración perteneciente a las Fases 11 y 13 del yacimiento.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coef. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
A	130,608	317.525	818.672	2.578	670,223.761	2.500	16.000	58.000	246.000	72,128.000
11	856	114.589	541.397	4.725	293,110.681	2.500	10.000	16.000	39.000	15,000.000
13	816	400.578	650.599	1.624	423,279.557	2.500	28.000	114.000	443.000	4,000.000
CS	22,187	39.845	149.876	3.761	22,462.767	2.500	10.000	14.000	27.000	7,834.000
11	372	19.087	25.485	1.335	649.498	2.500	5.000	13.000	26.000	297.000
13	228	38.664	126.447	3.270	15,988.943	2.500	5.000	11.000	20.000	1,633.000
K	6,521	16.124	47.797	2.964	2,284.519	2.500	5.000	10.000	13.000	4,000.000
11	121	12.472	15.650	1.255	244.920	2.500	5.000	9.000	11.000	89.000
13	155	12.518	13.557	1.083	183.804	2.500	5.000	10.000	12.000	112.000
P	89,485	44.385	137.678	3.102	18,955.247	2.500	10.000	20.000	36.000	7,000.000
11	794	77.204	249.212	3.228	62,106.747	2.500	12.000	20.000	35.000	3,150.000
13	1,125	108.236	338.444	3.127	114,544.158	2.500	14.000	27.000	62.000	4,000.000
QS	144,599	147.628	561.245	3.802	314,995.611	2.500	10.000	22.000	83.000	49,000.000
11	2,455	94.442	361.791	3.831	130,892.933	2.500	9.000	19.000	42.000	4,000.000
13	1,463	203.236	497.592	2.448	247,598.254	2.500	15.000	41.000	137.000	4,800.000

C. Zona Mineral

Las anomalías de concentración de arsénico que tienen estas Fases con respecto al yacimiento son mucho mayores, tal como se observa en la Tabla 4.8, la Fase 11 tiene altos contenidos en zonas mixtas (MIX) y en sulfuros secundarios (SEC) con medianas de 750 ppm y 136 ppm, respectivamente, en tanto, la Fase 13 tiene grandes anomalías en todas las zonas minerales del yacimiento, a excepción de las zonas primaria pirítica (PRIPY) y primaria (PRI), la mediana de las zonas minerales, de mayor a menor es la zona oxidada (OXI) con 386 ppm, la lixiviada (LIX) con 278 ppm, la zona mixta (MIX) con 212 ppm, y por último, los sulfuros secundarios (SEC) con 144 ppm.

Tabla 4.8. Estadística del arsénico en ppm según cada zona mineral perteneciente a las Fases 11 y 13 del yacimiento.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
LIX	68,652	484.223	1,016.522	2.099	1,033,316.442	2.500	33.000	144.000	511.000	72,128.000
11	2	18.714	4.950	0.264	24.500	13.000	20.000	20.000	20.000	20.000
13	437	622.642	850.923	1.367	724,070.450	2.500	110.000	278.000	837.000	7,000.000
MIX	8,344	255.786	766.805	2.998	587,990.067	2.500	22.000	56.000	152.000	18,090.000
11	3	850.333	210.291	0.247	44,222.333	709.000	709.000	750.000	1,092.000	1,092.000
13	33	355.170	388.781	1.095	151,150.862	2.500	43.000	212.000	563.000	1,503.000
OXI	10,315	267.519	630.004	2.355	396,904.676	2.500	17.000	49.000	182.000	7,523.000
11	0									
13	35	802.759	725.541	0.904	526,409.856	79.000	165.000	386.000	1,514.000	2,254.000
PRI	125,682	49.239	403.114	8.187	162,501.038	2.500	9.000	10.000	20.000	75,900.000
11	3,543	70.595	364.834	5.168	133,103.849	2.500	6.000	12.000	26.000	15,000.000
13	1,328	192.638	775.524	4.026	601,437.694	2.500	6.000	11.000	29.000	15,000.000
PRIPY	152,093	44.431	187.173	4.213	35,033.572	2.500	10.000	17.000	32.000	34,729.000
11	2,071	38.768	78.005	2.012	6,084.758	2.500	10.000	19.000	33.000	1,761.000
13	2,008	61.103	94.643	1.549	8,957.363	2.500	14.000	28.000	62.000	1,272.000
SEC	96,046	214.637	715.754	3.335	512,304.275	2.500	23.000	61.000	159.000	49,000.000
11	197	441.056	951.751	2.158	905,829.965	2.500	35.000	136.000	371.000	8,270.000
13	353	440.017	644.834	1.465	415,810.502	2.500	79.000	194.000	476.000	4,000.000

D. Estructuras

En general, las estructuras contienen altos contenidos de arsénico en la Fase 13, destacando las brechas de falla (BRE) con mediana de 142 ppm, le sigue las fracturas (FRAC) con 132 ppm, las vetas y/o vetillas (VET) con 115 ppm, mientras que las fallas (FAL) si bien tiene un contenido sobre la mediana del yacimiento, es la estructura con menor contenido de este elemento con 47 ppm, tal como se observa en la Tabla 4.9, en tanto en la Fase 11, las vetas y/o vetillas (VET) son las únicas estructuras que poseen valor sobre la mediana de arsénico en el yacimiento, con 49 ppm.

Tabla 4.9. Estadística del arsénico en ppm según estructuras de las Fases 11 y 13 del yacimiento.

Name	Count	Mean	Std. dev.	Coeff. var.	Variance	Minimum	L. quartile	Median	U. quartile	Maximum
as	489,741	163.015	610.701	3.746	372,955.915	2.500	10.000	22.000	77.000	75,900.000
BRE	14,320	301.894	720.743	2.387	519,470.681	2.500	19.000	49.000	200.000	15,100.000
11	65	155.640	644.176	4.139	414,962.215	2.500	10.000	21.000	47.000	4,000.000
13	73	214.708	382.211	1.780	146,085.342	2.500	35.000	142.000	204.000	4,000.000
FAL	50,155	213.594	605.483	2.835	366,609.726	2.500	12.000	28.000	123.000	16,900.000
11	364	69.226	196.369	2.837	38,560.608	2.500	11.000	20.000	46.000	2,500.000
13	327	276.445	559.525	2.024	313,067.751	2.500	22.000	47.000	228.000	4,000.000
FRAC	12,490	168.589	521.385	3.093	271,842.809	2.500	13.000	30.000	116.000	15,100.000
11	47	377.337	1,342.910	3.559	1,803,406.171	9.000	14.000	21.000	87.000	8,270.000
13	2	86.706	77.782	0.897	6,050.000	22.000	22.000	132.000	132.000	132.000
VET	12,824	688.085	1,331.329	1.935	1,772,436.517	2.500	31.000	110.000	648.000	37,500.000
11	285	597.359	1,336.324	2.237	1,785,762.863	2.500	20.000	49.000	362.000	15,000.000
13	200	958.216	2,077.320	2.168	4,315,256.892	2.500	31.000	115.000	530.000	15,000.000

4.1.3. Relación de las Fallas Principales con el Arsénico

Se realiza un análisis estadístico similar al que hizo Riquelme y otros (2014) para ver la relación de las estructuras con el arsénico. En este caso, es con respecto a las fallas principales del yacimiento, es decir, las Fallas Rosario, Pique y Última (Figuras 4.9 y 4.10). Para esto se utilizan las triangulaciones de fallas del yacimiento en conjunto con la base de datos de sondajes compositados cada dos metros, utilizando el *software* LeafrogGeo en conjunto con Excel.

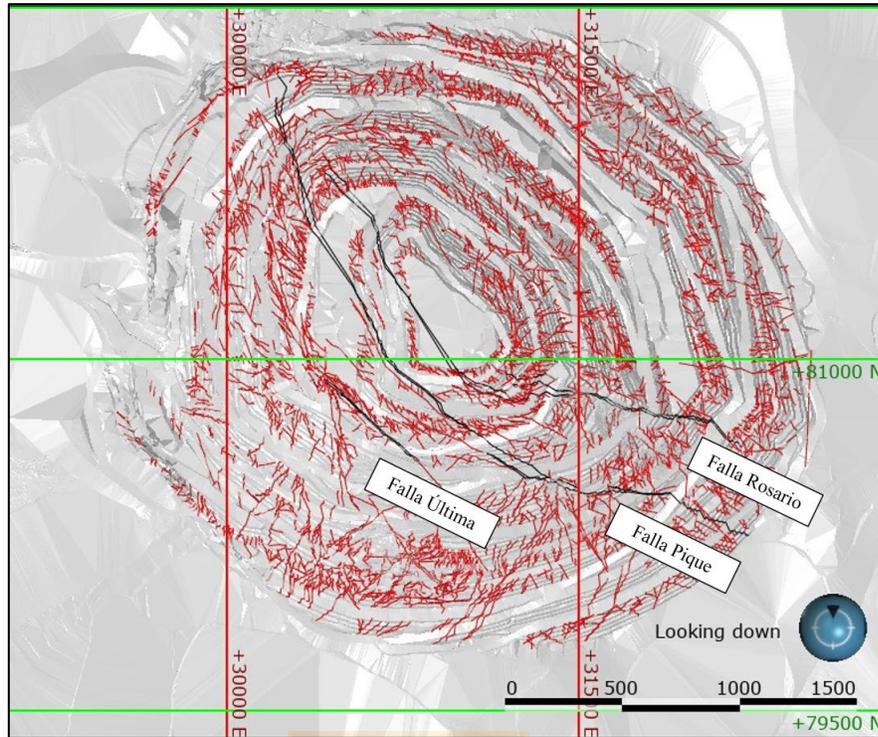


Figura 4.9. Vista en planta del pit Rosario con las tres fallas principales y fallas menores en rojo. Extraído de Garay (2021).

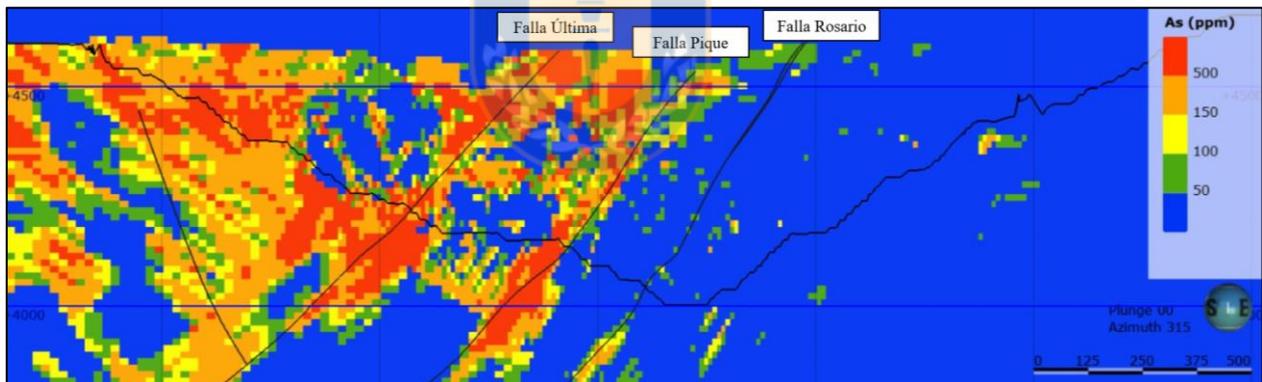


Figura 4.10. Perfil de la distribución de leyes de arsénico en ppm en el yacimiento y en las tres fallas principales.

4.1.3.1. Falla Rosario

Dentro de las fallas principales, la Falla Rosario es la que tiene asociado el menor contenido de arsénico en el yacimiento Rosario. En las figuras 4.11 y 4.12 se observa que este elemento a medida que se acerca a la falla aumenta su contenido. Dentro de los primeros 15 m la mediana de arsénico llega a 14 ppm, y a medida que la distancia aumenta se estabiliza en los 10 ppm. Se interpreta que la Falla Rosario tiene influencia en el arsénico hasta los 45 m de distancia, ya que luego, la anomalía de este elemento se mantiene constante.

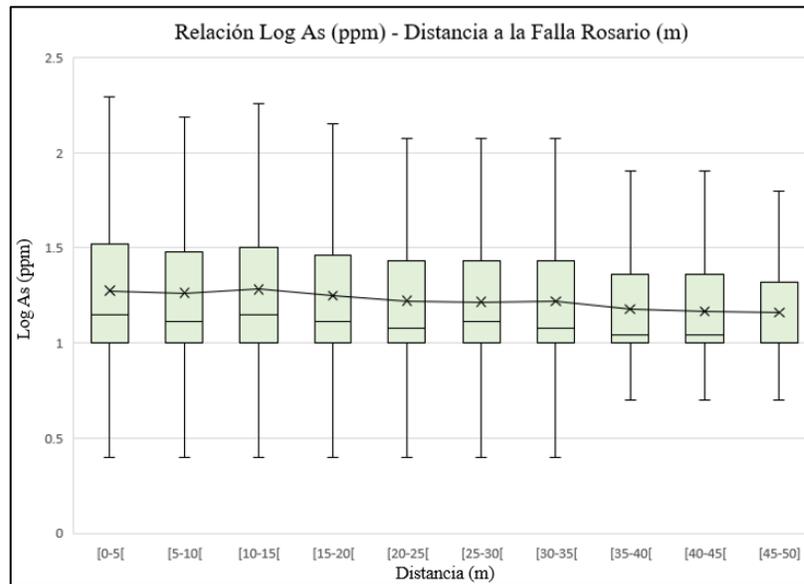


Figura 4.11. Diagrama de caja que muestra la relación entre el logaritmo de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Rosario.

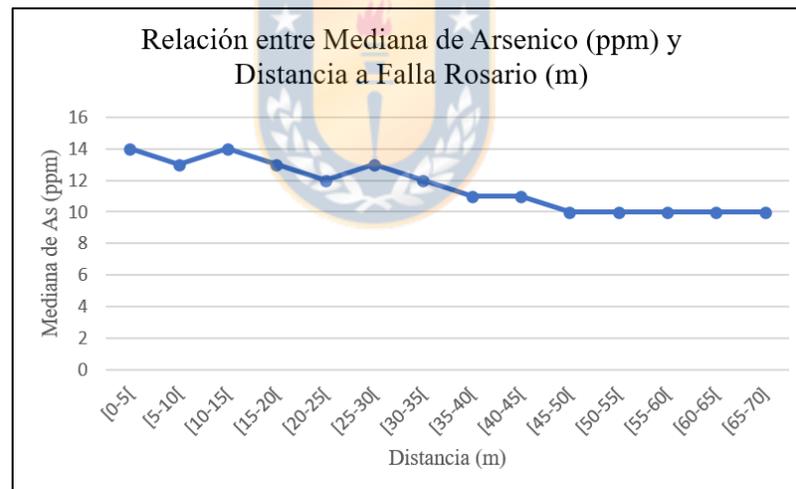


Figura 4.12. Gráfico que muestra la relación entre la mediana de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Rosario.

4.1.3.2. Falla Pique

La Falla Pique corresponde a la segunda falla con mayor contenido de arsénico asociado. En las Figuras 4.13 y 4.14 se observa una estrecha relación de este elemento con respecto a esta Falla, ya que mientras más cerca de la falla, el contenido de arsénico es mayor. Dentro de los primeros 5 m el valor de la mediana llega a 28 ppm. Su área de influencia llega hasta los primeros 30 m, ya que luego de esta distancia la mediana se estabiliza entre los 18 ppm.

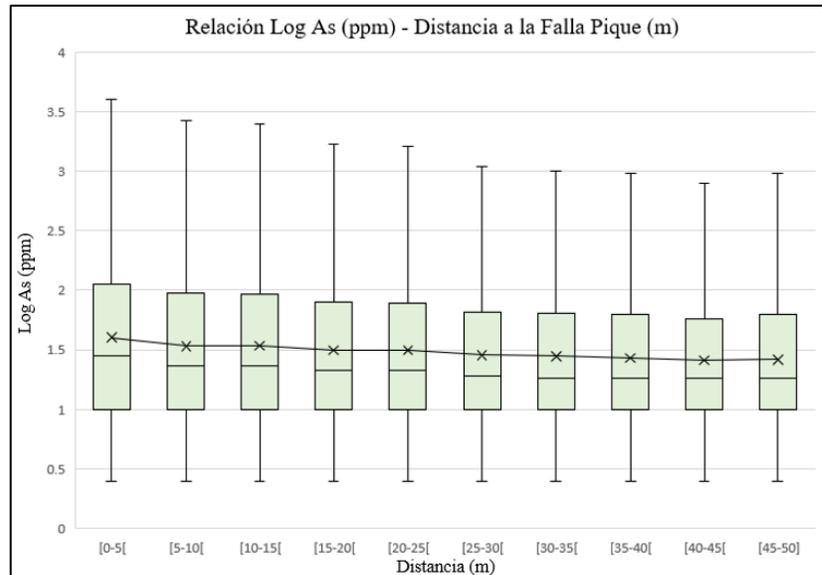


Figura 4.13. Diagrama de caja que muestra la relación entre el logaritmo de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Pique.

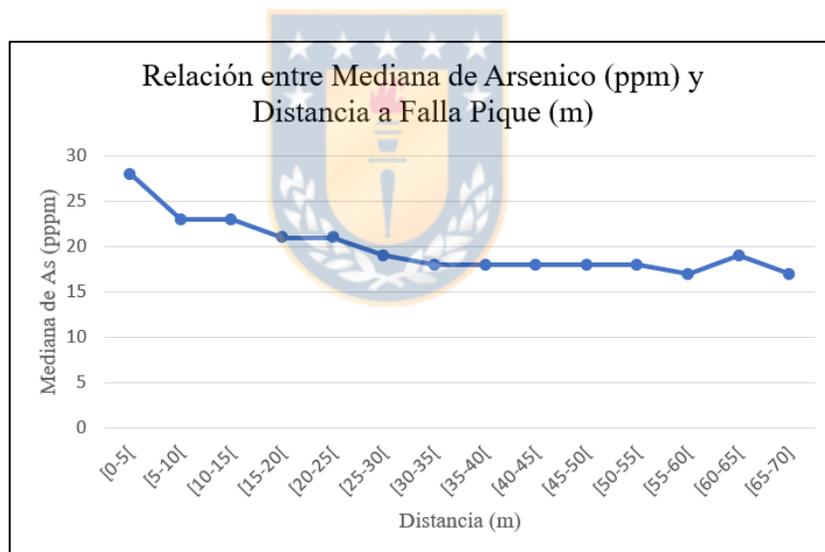


Figura 4.14. Gráfico que muestra la relación entre la mediana de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Pique.

4.1.3.3. Falla Última

La Falla Última es la estructura del yacimiento que presenta las mayores anomalías asociadas al arsénico. En las Figuras 4.15 y 4.16 se observa una relación muy clara de este elemento con anomalías muy altas, superiores a la mediana del yacimiento. En los primeros 15 m la mediana tiene valores sobre los 34 ppm, llegando a 38 ppm, la concentración de arsénico va disminuyendo con cierta tendencia hasta los 40 m, luego hay un quiebre estabilizando la mediana entre 24 y 20

ppm de este elemento. Se interpreta que el área de influencia de esta falla es mayor a las otras dos, ya que a partir de los 65 m existen valores menores a la mediana de arsénico del yacimiento.

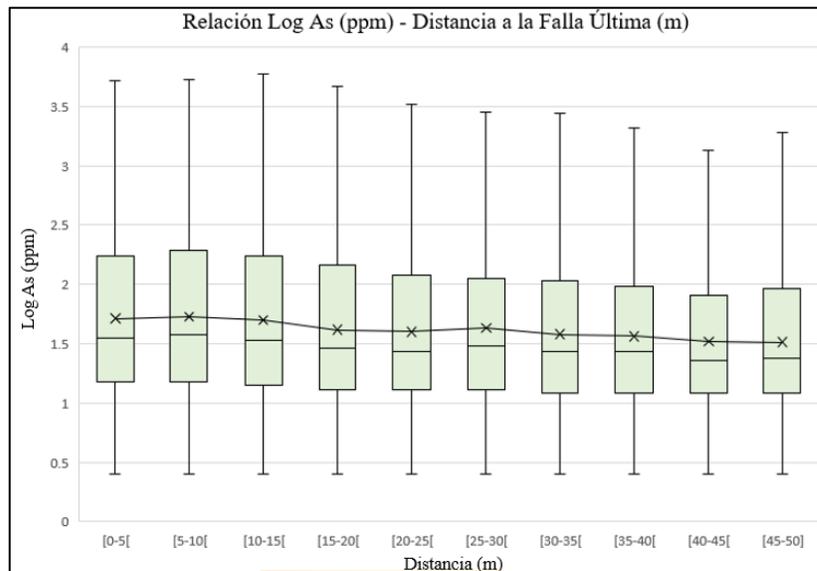


Figura 4.15. Diagrama de caja que muestra la relación entre el logaritmo de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Última.

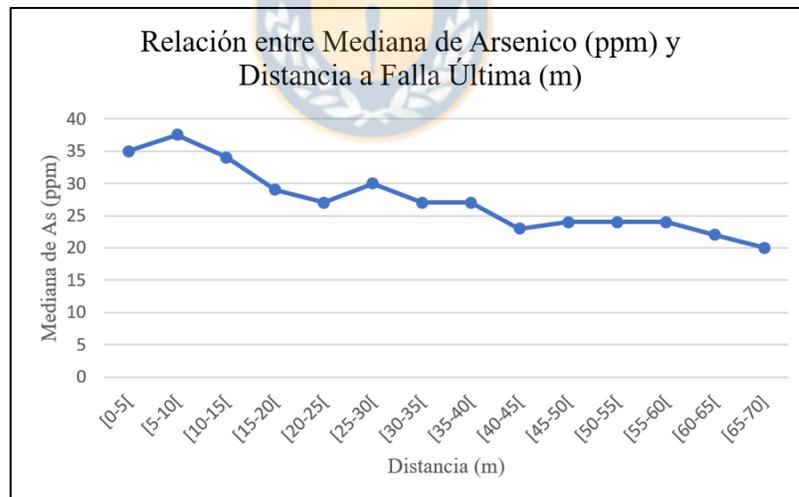


Figura 4.16. Gráfico que muestra la relación entre la mediana de la concentración de arsénico y la distancia a la Falla Última.

4.2. Muestras Macroscópicas

En este estudio se extraen 24 muestras, 16 de la Fase 11 y 8 de la Fase 13, de las cuales se escogen 15 en total para realizar estudios petrográficos y análisis QUEMSCAN. A estas muestras

macroscópicas se les realiza una descripción detallada (Anexo 1), con la finalidad de identificar roca original, alteraciones, asociación mineral, minerales portadores de arsénico, entre otros. A continuación, se describen las ocurrencias de los minerales de arsénico vistas en este estudio.

4.2.1. Caracterización de la Mineralización de Arsénico

El mineral portador de arsénico observado en las muestras corresponde a enargita, su principal ocurrencia es en vetas y vetillas, ya sea en aspecto masivo y/o cristalino. Se observó otro tipo de rocas como tobas y brechas, sin embargo, en estas no fue posible distinguir enargita a pesar de que, según la base de datos, estas contienen altas concentraciones de este mineral.

4.2.1.1. Vetos

Las muestras extraídas que corresponden a fragmentos de vetas de gran potencia (Figura 4.17) son posible observarlas en ambas Fases, la enargita se observa de manera terrosa y cristalina, y se encuentra asociada a pirita, calcosina, digenita, calcopirita y bornita.

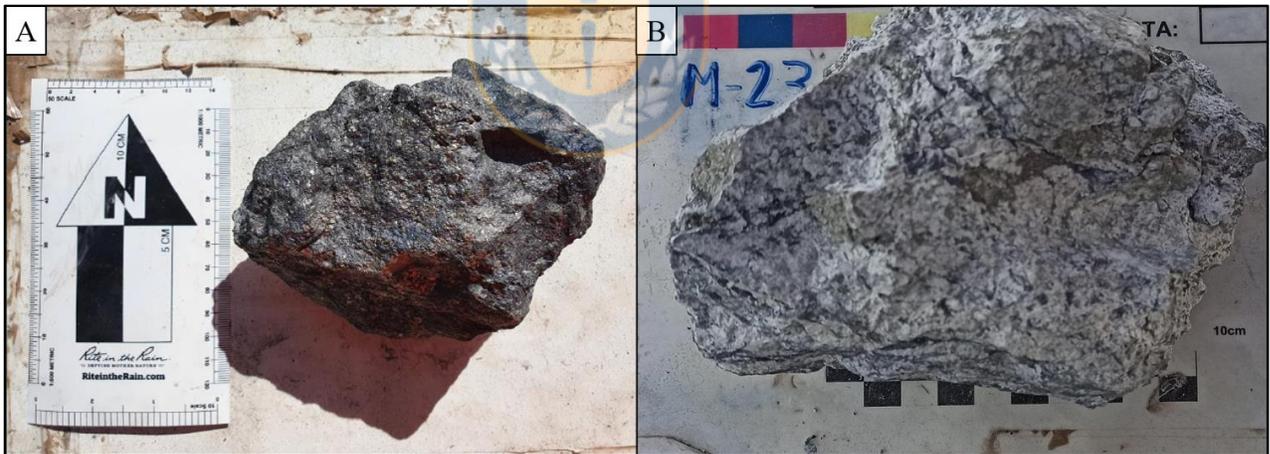


Figura 4.17. Muestras pertenecientes a vetas de la Fase 11. (A) Muestra M-06 correspondiente a fragmento de veta constituida principalmente por sulfuros y sulfoarseniuros. (B) Muestra M-23 pertenece a veta de cuarzo con pirita, y tiene asociado vetillas finas de bornita-enargita y calcosina.

4.2.1.2. Brecha de Falla

Se extrajeron muestras de brecha de falla, ya que el arsénico está asociado a fallas, estas muestras se obtuvieron principalmente de la Fase 13, la roca huésped es de composición andesítica, los sulfuros apreciados en específico en la muestra de la Figura 4.18 corresponden principalmente a pirita y calcosina, no fue posible distinguir enargita.



Figura 4.18. Muestra M-14 correspondiente a brecha de falla de la Fase 13.

4.2.1.3. Brecha Hidrotermal Lixiviada

Se extrae muestra de brecha hidrotermal (Figura 4.19) con alteración argílica avanzada de la periferia del yacimiento, de color rojizo y posee textura vuggy silica con abundantes limonitas. Esta muestra era de principal interés porque en trabajos recientes se destaca la presencia de escorodita (Garay, 2021). Este mineral no fue posible reconocerlo de manera microscópica, y en el análisis QEMSCAN la escorodita no formaba parte de la lista de minerales preseleccionados para identificar, por ende, no se obtuvo información específica, sin embargo es posible que cierto porcentaje de la categoría “Other” en esta muestra represente escorodita, por lo que no es posible descartar la presencia de este mineral.



Figura 4.19. Muestra M-20 correspondiente a brecha hidrotermal lixiviada de la Fase 13.

4.2.1.4. Toba

Esta litología es de las principales contenedoras de arsénico en el yacimiento según la base de datos, por lo que caracterizarla y ver con que minerales se encuentra asociado es fundamental. La roca se encontraba completamente argilizada y obliterada (Figura 4.20), distinguiéndose solo los cristales de cuarzo. La veta es de crisocola con un espesor de 3 a 4 cm aproximadamente, con una sutura de sulfuros que corresponde principalmente a calcosina y pirita, no fue posible observar enargita en esta muestra.

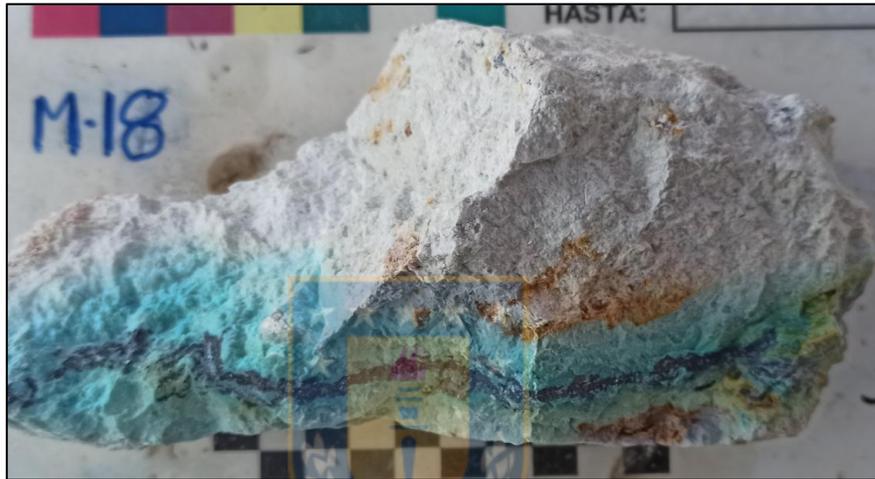


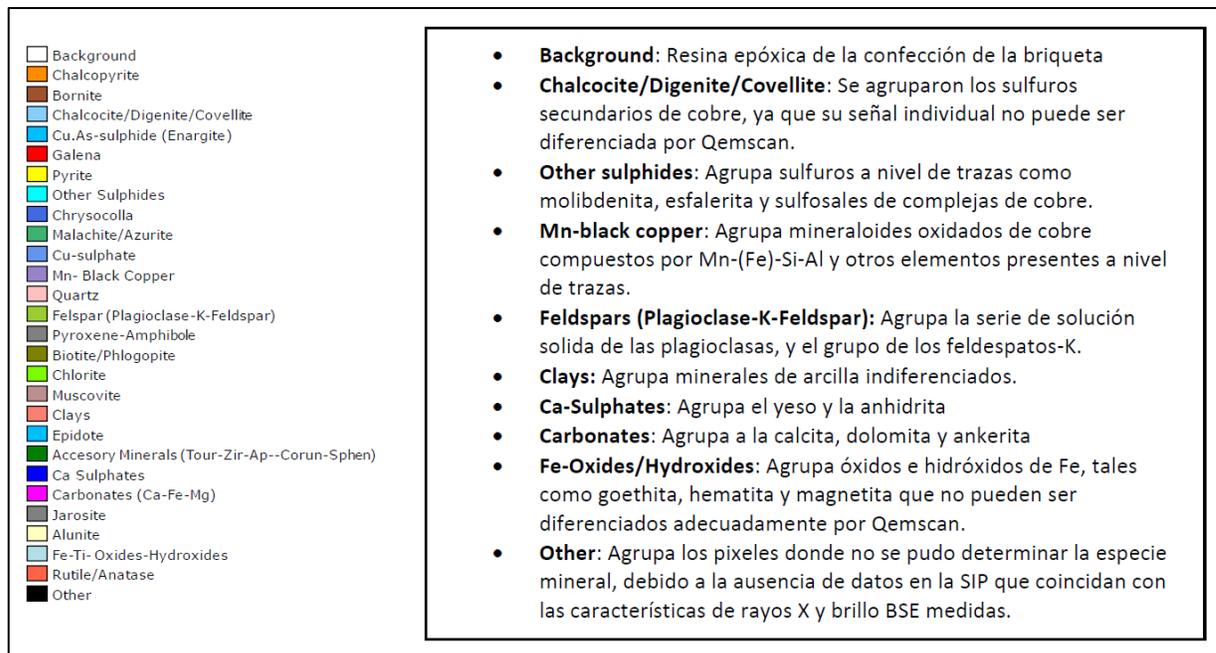
Figura 4.20. Muestra M-18 correspondiente a toba de la Fase 13.

4.3. Análisis QEMSCAN

Las 15 muestras seleccionadas en el Capítulo 4.2, se escogieron según la variedad de las muestras extraídas, y de acuerdo con la distribución y lugar de interés en el área de estudio. Estas muestras se analizan por mineralogía automatizada a través del sistema QEMSCAN-650, con el objetivo de realizar un estudio cuantitativo de mineralogía mena-ganga. Las condiciones generales del instrumento para la identificación de minerales se muestran en la Tabla 4.10. Los datos colectados en cada *pixel* en el análisis automatizado de QEMSCAN son clasificados utilizando una base de datos incorporada en el programa de análisis (*Specific Identification Protocol*, SIP) que se fundamenta en la química mineral por análisis dispersiva (EDS) de los minerales de mena y ganga más frecuentes. El *software* de interpretación y análisis de datos simplifica la información obtenida creando agrupamientos de minerales como se observa en la Figura 4.21.

Tabla 4.10. Características de sistema QEMSCAN utilizado para el análisis de las muestras.

QEMSCAN	QEMSCAN 650
Plataforma	Idiscover-Imeasure 5.3
SEM Plataforma	Quanta System
Distancia entre puntos	5 μm
Modo de medición	Fieldscan
Tiempo de medición	5 hrs. (en promedio en la modalidad de análisis Fieldscan)
Voltaje de aceleración	25 Kv
Detectores	2 Xflash Bruker 6130 N2L Free
Corriente de filamento	3
Corriente absorbida	5 nA
Calibración BSE	3 puntos, Cuarzo (44), Cu (130), Au (232)
Calibración espectrómetros	Cu ($L\alpha$) and Cu ($K\alpha$)
Brillo y contraste	29/91.4
Distancia de trabajo	10 mm (en promedio)
Tamaño de campo	2000 μm equivalente a 200x (magnificación)
Vacío estándar	$<5 \cdot 10^{-5}$ Torr

**Figura 4.21.** Leyenda utilizada en el análisis QEMSCAN junto con agrupación de elementos similares.

4.3.1. Caracterización Mineral

En este capítulo se evidencia cuantitativamente el recuento modal (% en peso) de las especies minerales medidas en el análisis QEMSCAN en este estudio. En la Figura 4.22 se observa de manera gráfica las muestras con mayor recuento modal de arsénico expresado en enargita, estas corresponden a M-06 con 14,42%, M-11 con 12,42%, M-23 con 4,82% y M-10 con 3,03%, existen otras 5 muestras con contenido de este mineral, pero con un porcentaje modal menor a 1% (Tabla 4.11). Cabe destacar que en las muestras con mayor contenido del agrupamiento mineral “Other Sulphides” de la leyenda, abarca sulfosales complejos de cobre, por ende, es probable encontrar otro mineral portador de arsénico como la tennantita, esto podría ser evidenciado en estudios de mayor detalle y con tecnología de mayor alcance, lo mismo ocurre con la categoría “Other” que podría contener otros minerales de arsénico que no contienen azufre, como por ejemplo la escorodita.

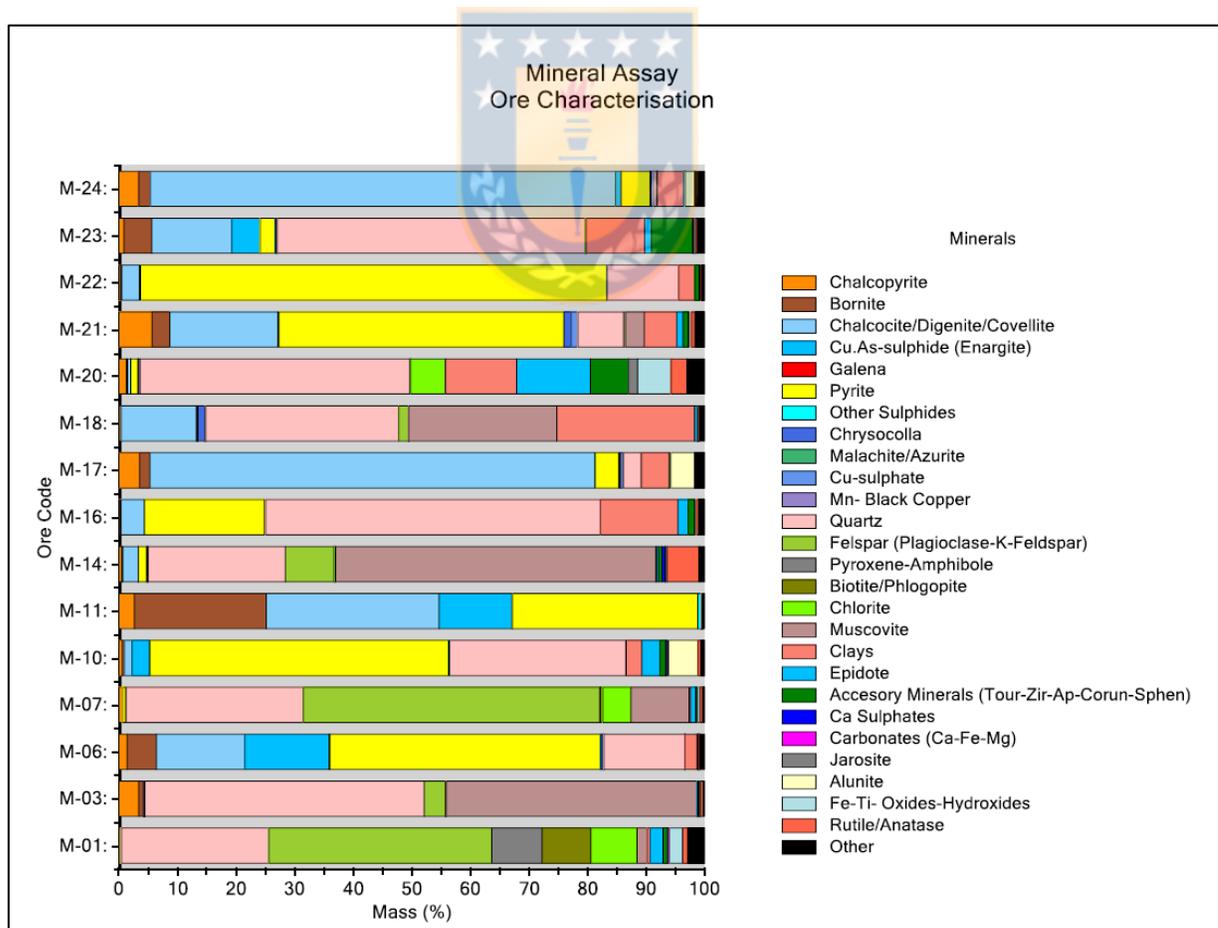


Figura 4.22. Diagrama acumulativo de la mineralogía modal según porcentaje en masa de las muestras de este estudio.

Tabla 4.11. Porcentaje en peso de minerales contenidos en cada una de las muestras extraídas para este estudio.

Minerals/samples	Mineral Mass														
	M-01	M-03	M-06	M-07	M-10	M-11	M-14	M-16	M-17	M-18	M-20	M-21	M-22	M-23	M-24
Chalcocopyrite	0,11	3,46	1,45	0,66	0,61	2,72	0,53	0,24	3,56	0,34	1,31	5,69	0,33	0,89	3,43
Bornite	0,00	0,75	5,02	0,00	0,36	22,48	0,17	0,14	1,80	0,09	0,17	3,02	0,20	4,79	2,01
Chalcocite/Digenite/Covellite	0,00	0,05	15,04	0,00	1,31	29,53	2,65	4,03	75,95	12,88	0,57	18,46	3,00	13,62	79,40
Cu-As-sulphide (Enargite)	0,00	0,00	14,42	0,00	3,03	12,42	0,00	0,02	0,08	0,00	0,00	0,20	0,20	4,82	0,99
Galena	0,00	0,00	0,11	0,00	0,02	0,10	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,04	0,01
Pyrite	0,34	0,03	46,19	0,61	51,00	31,63	1,43	20,49	4,00	0,19	1,24	48,66	79,64	2,54	4,87
Other Sulphides	0,00	0,00	0,10	0,01	0,05	0,58	0,00	0,04	0,14	0,03	0,00	0,04	0,01	0,06	0,03
Chrysocolla	0,00	0,10	0,35	0,00	0,02	0,00	0,12	0,07	0,13	1,11	0,04	1,13	0,02	0,21	0,14
Malachite/Azurite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01
Cu-sulphate	0,00	0,04	0,14	0,00	0,06	0,03	0,10	0,05	0,49	0,20	0,03	1,14	0,02	0,09	0,46
Mn- Black Copper	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,32	0,02	0,00	0,01	0,00
Quartz	25,18	47,70	13,82	30,23	30,13	0,11	23,38	57,10	3,01	32,93	46,06	7,82	12,17	52,58	0,56
Felspar (Plagioclase-K-Feldspar)	38,06	3,62	0,00	50,63	0,03	0,00	8,28	0,03	0,02	1,68	0,06	0,31	0,00	0,05	0,02
Pyroxene-Amphibole	8,61	0,02	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Biotite/Phlogopite	8,33	0,11	0,00	0,47	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Chlorite	7,84	0,05	0,01	4,83	0,00	0,01	0,10	0,03	0,01	0,03	5,93	0,01	0,01	0,04	0,01
Muscovite	1,78	42,80	0,00	9,88	0,01	0,00	54,55	0,01	0,04	25,28	0,05	3,20	0,00	0,10	0,02
Clays	0,52	0,02	2,10	0,32	2,69	0,01	0,08	13,22	4,72	23,49	12,10	5,57	2,73	9,92	4,56
Epidote	2,14	0,09	0,07	0,81	3,09	0,00	0,32	1,77	0,10	0,50	12,60	1,06	0,04	1,21	0,05
Accessory Minerlas (Tour-Zir-Ap-Corun-Sphen)	0,86	0,13	0,15	0,33	0,98	0,01	0,86	1,06	0,06	0,02	6,49	0,88	0,77	6,99	0,07
Ca Sulphates	0,01	0,06	0,01	0,01	0,22	0,00	0,55	0,13	0,09	0,08	0,02	0,18	0,01	0,14	0,05
Carbonates (Ca-Fe-Mg)	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Jarosite	0,01	0,22	0,08	0,07	0,25	0,07	0,12	0,11	0,01	0,02	1,54	0,22	0,17	0,13	0,03
Alunite	0,00	0,06	0,02	0,00	5,06	0,00	0,15	0,16	4,07	0,04	0,02	0,17	0,14	0,15	1,61
Fe-Ti-Oxides-Hydroxides	2,20	0,03	0,00	0,37	0,01	0,00	0,06	0,05	0,02	0,02	5,67	0,01	0,00	0,06	0,00
Rutile/Anatase	0,88	0,41	0,17	0,41	0,45	0,00	5,51	0,33	0,02	0,23	2,76	0,56	0,09	0,35	0,02
Other	2,85	0,22	0,73	0,32	0,62	0,29	0,88	0,91	1,63	0,80	2,92	1,59	0,43	1,20	1,64

De manera más específica, en la Figura 4.23 se observa el aporte de Cu de acuerdo con las especies portadoras del metal en las muestras, en el cual se aprecia de manera más clara la cantidad de enargita en cada muestra. Se evidencia que cuando existen contenidos de enargita, estos se encuentran en relación con sulfuros secundarios de cobre como digenita, calcosina y covelina, así como también con bornita y calcopirita. En el Anexo 3 se muestran las leyes mínimas de As, Cu y Fe de acuerdo con las cantidades (porcentaje en peso) y fórmulas de las especies portadoras reconocidas en el análisis QEMSCAN, ya que si se consideraran otros posibles minerales portadores subirían las concentraciones de estos elementos.

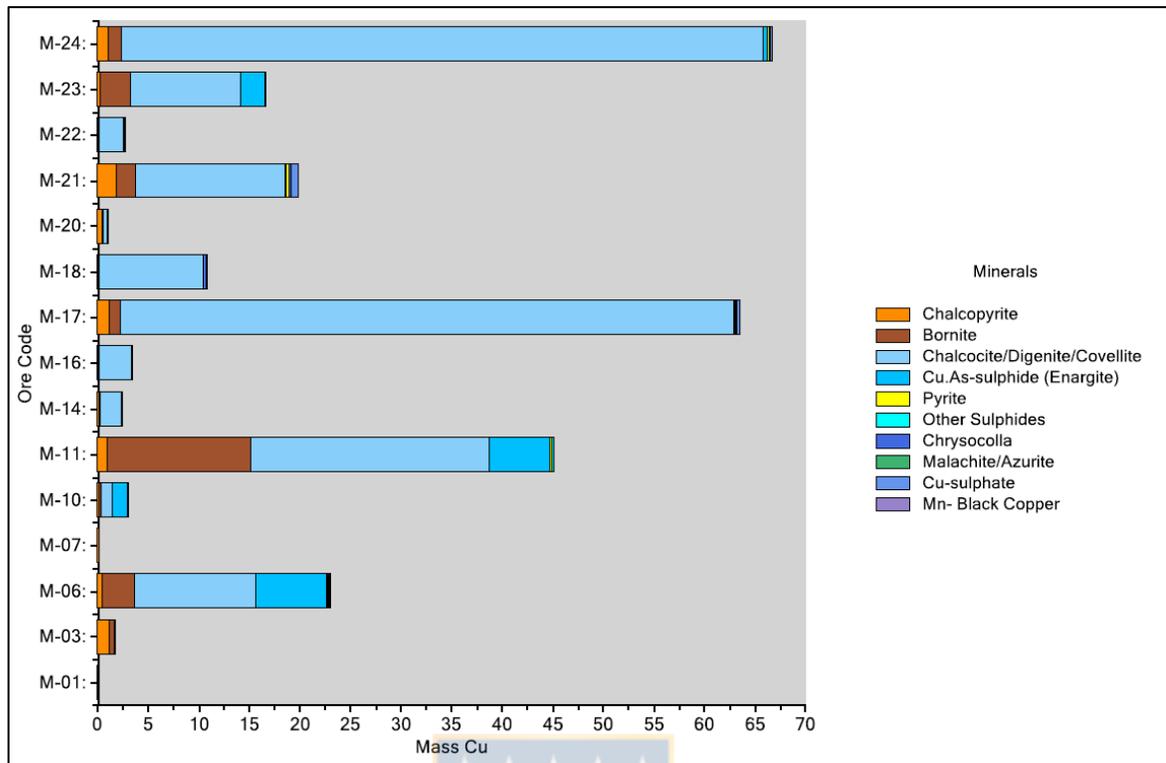


Figura 4.23. Diagrama de barras con los aportes de Cu (%) en cada muestra, de acuerdo con el contenido medido de las especies portadoras.

4.4. Análisis Petro-Calcográfico

En las mismas muestras que se realizaron análisis QEMSCAN para identificar los minerales de manera cuantitativa, se realizaron cortes pulido-transparentes para observar los minerales metálicos principales (mena y ganga), forma, minerales asociados a la enargita (principal portador de arsénico) y texturas en las asociaciones presentes en los distintos dominios (litología, alteración y zona mineral) en este estudio.

Las muestras seleccionadas para observar microscópicamente corresponden a estructuras como vetas y brechas de fallas, y litologías como brecha hidrotermal lixiviada y tobas. Las alteraciones corresponden mayoritariamente a argílica intermedia a avanzada (A), y en menor medida, propilítica (P) y cuarzo-sericita (QS). La alteración dominante donde se observa enargita es la argílica intermedia a avanzada, compuesta por arcillas, sericita, alunita, pirofilita, entre otros. La mena principal de los cortes que se distingue corresponde a los sulfuros secundarios, principalmente calcosina y digenita. La bornita también está presente en gran proporción en la

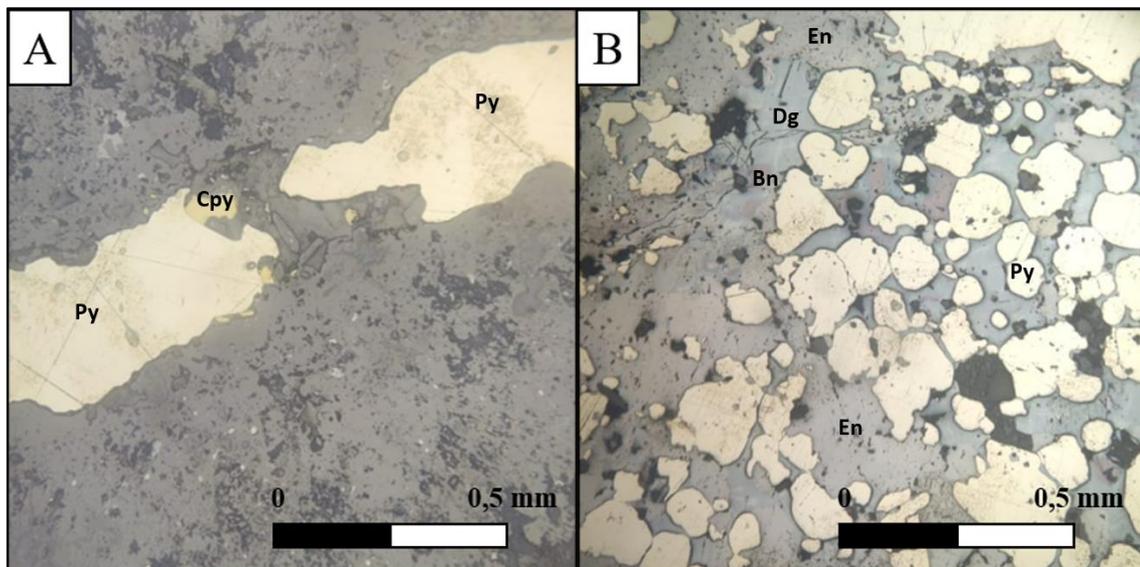
mayoría de las muestras. La enargita se observa de manera muy notoria en 4 muestras, mientras que en otras se observa de manera puntual e incluso, es posible identificarla solamente por análisis QEMSCAN. La calcopirita está presente en todas las muestras, sin embargo, no en todas se observa microscópicamente. Por último, también fue posible observar oxidados de cobre en algunas muestras. La mineralización en el yacimiento Rosario es posible observarla como monomineral y formando asociaciones, como se detalla a continuación.

4.4.1. Descripción Mineralógica

En este capítulo se describen los minerales metálicos observados según el tamaño mineral, la forma en que se encuentra, ya sea anhedral, subanhedral o euhedral, y ocurrencia, es decir, si se encuentra rellenando espacios, si esta diseminada en las vetillas, etc.

4.4.1.1. Pirita

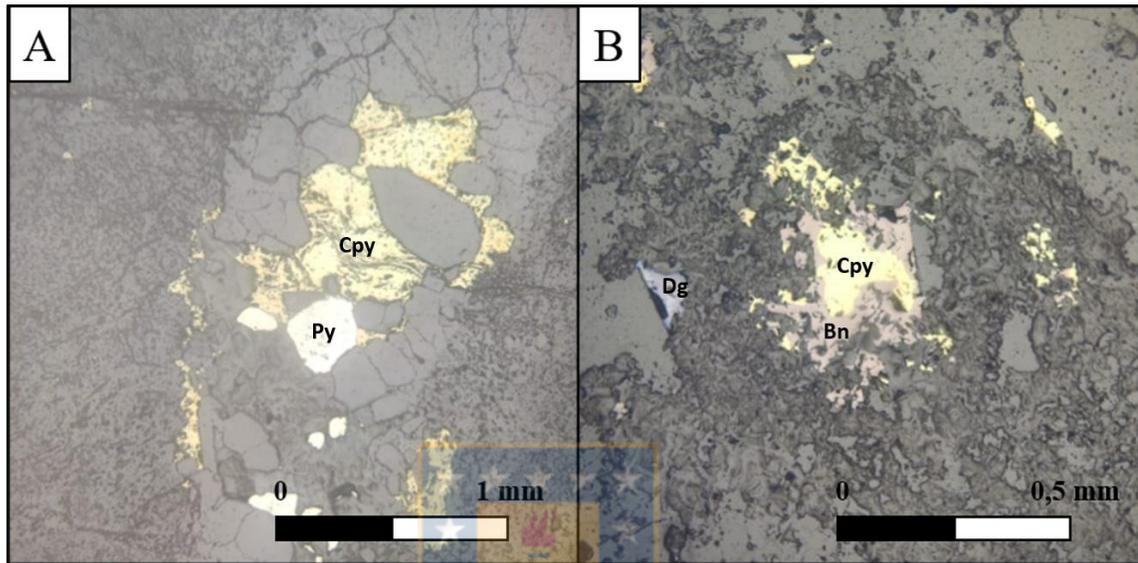
Los cristales de pirita son principalmente subhedrales y en menor medida anhedral, euhedral y brechizados, los cuales se encuentran de manera diseminada y como relleno de fracturas, microfracturas, vetillas y vetas. Los tamaños oscilan entre $<29 \mu\text{m}$ a 1 cm aproximadamente (Fotomicrografía 4.1).



Fotomicrografía 4.1. Pirita en las muestras en estudio. (A) Muestra M-01 en Luz Reflejada, Nicols Paralelos y Aumento 10x, pirita en vetilla discontinua con entrecrecimiento de calcopirita. (B) Muestra M-06 en Luz Reflejada, Nicols Paralelos y Aumento 10x, granos de pirita diseminados en el corte junto bornita, digenita y enargita.

4.4.1.2. Calcopirita

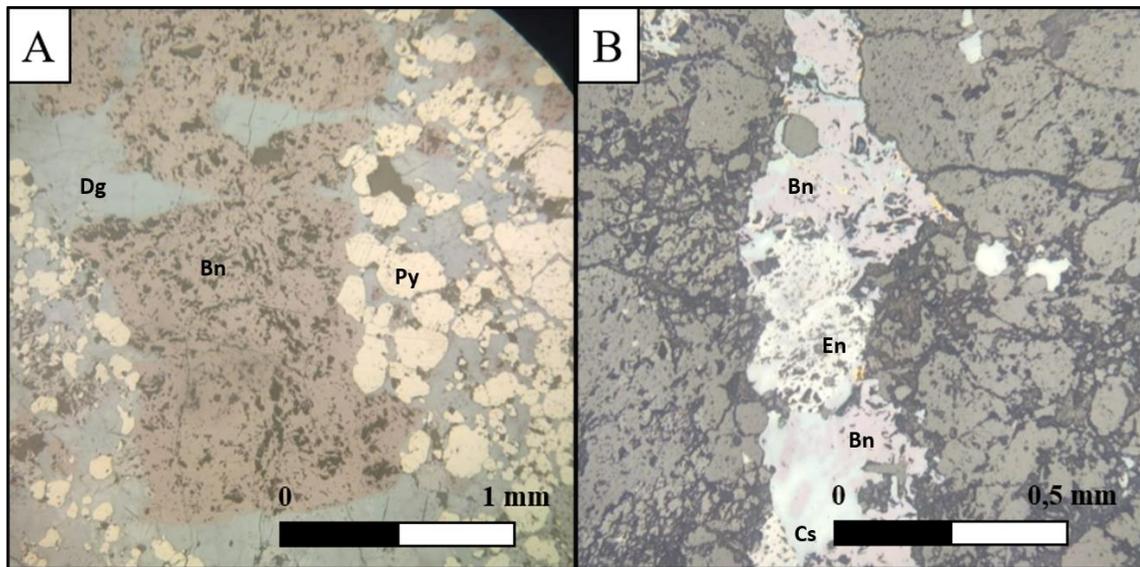
La calcopirita se observa de manera anhedral mayoritariamente y algunos granos se ven brechizados, este mineral se encuentra rellenando espacios de manera diseminada y en vetillas (Fotomicrografía 4.2). Los tamaños oscilan entre $<23\ \mu\text{m}$ a 1,5 mm aproximadamente.



Fotomicrografía 4.2. Calcopirita en las muestras en estudio. (A) Muestra M-07 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 5x, calcopirita en entrecrecimiento con pirita en vetilla y minerales no metálicos. (B) Muestra M-03 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 10x, calcopirita diseminada en el corte y en textura de reemplazo junto bornita.

4.4.1.3. Bornita

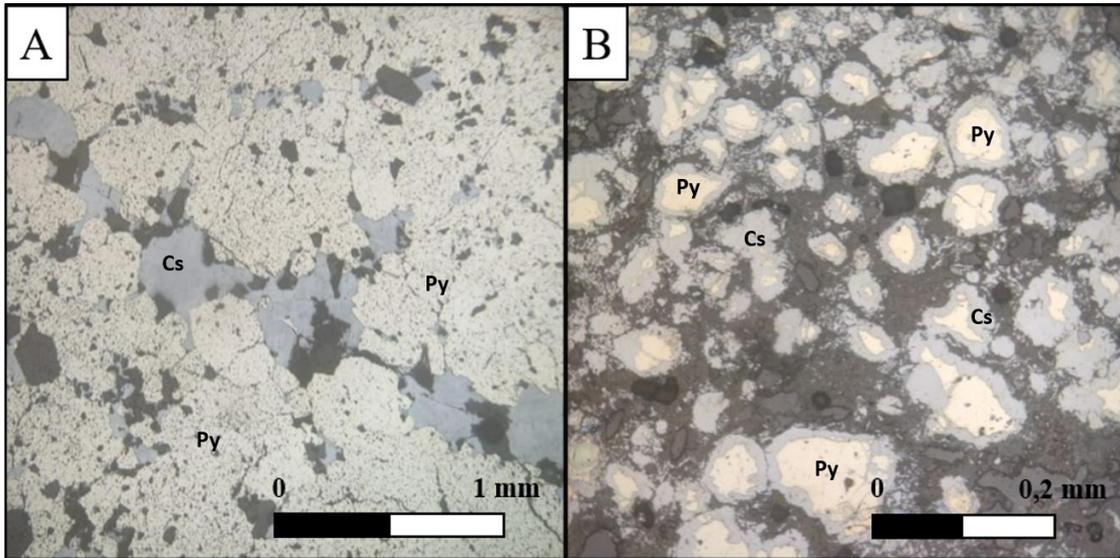
Se presentan cristales de bornita de forma anhedral a subhedral, y se encuentra en cúmulos junto con otros minerales y rellenando vetillas y microfracturas de manera continua y discontinua (Fotomicrografía 4.3). Los tamaños varían de $<22\ \mu\text{m}$ hasta 1 cm aproximadamente, en la mayoría de los cortes es posible observarla en conjunto con sulfuros secundarios en textura de reemplazo.



Fotomicrografía 4.3. Bornita en las muestras en estudio. (A) Muestra M-11 en Luz Reflejada, Nicols Paralelos y Aumento 5x, bornita en cúmulo y diseminada junto con pirita y digenita. (B) Muestra M-23 en Luz Reflejada, Nicols Paralelos y Aumento 10x, bornita en vetilla irregular, junto con enargita y en textura de reemplazo con calcosina.

4.4.1.4. Calcosina

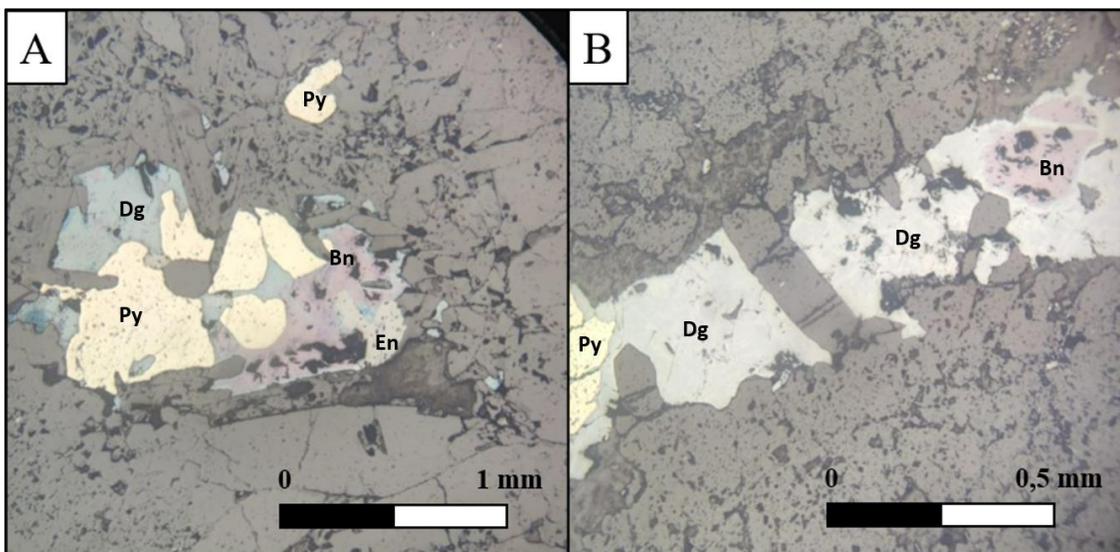
La mayoría de los cristales de calcosina presentan forma anhedral, sus tamaños van desde los $<22 \mu\text{m}$ en adelante, es posible observarla en vetillas (Fotomicrografía 4.4), tanto de manera continua como discontinua, también reemplazando a otros minerales, en algunas muestras está cubriendo casi todo el corte con cristales de tamaño micrométrico, en cambio, en ciertos cortes se observa como granos diseminados en toda la muestra, algo fracturados y envolviendo a una posible pirita primaria (Fotomicrografía 4.4).



Fotomicrografía 4.4. Calcosina en las muestras en estudio. (A) Muestra M-22 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 5x, granos de calcosina relleno de espacio junto con pirita. (B) Muestra M-14 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 20x, calcosina diseminada en el corte envolviendo a granos de pirita.

4.4.1.5. Digenita

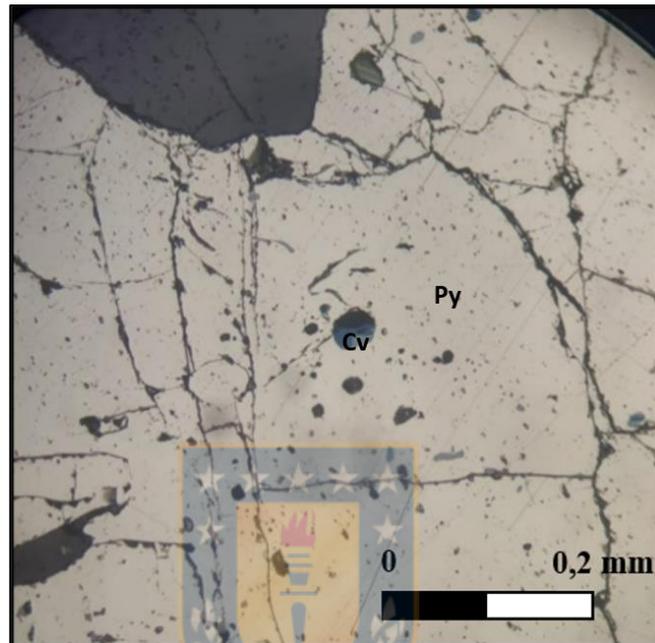
Los cristales observados de digenita tienen forma anhedral y en general son de tamaño micrométrico, abarcando desde $<22 \mu\text{m}$ hasta 1 mm como máximo. En su mayoría se encuentra reemplazando minerales, pero se aprecia tanto como relleno de vetillas, en cúmulo, así como diseminado a lo largo de los cortes (Fotomicrografía 4.5)



Fotomicrografía 4.5. Digenita en las muestras en estudio. (A) Muestra M-10 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 5x, digenita formando un cúmulo de minerales junto con pirita, bornita y enargita. (B) Muestra M-16 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 10x, digenita en vetilla irregular con pirita y reemplazando a bornita.

4.4.1.6. Covelina

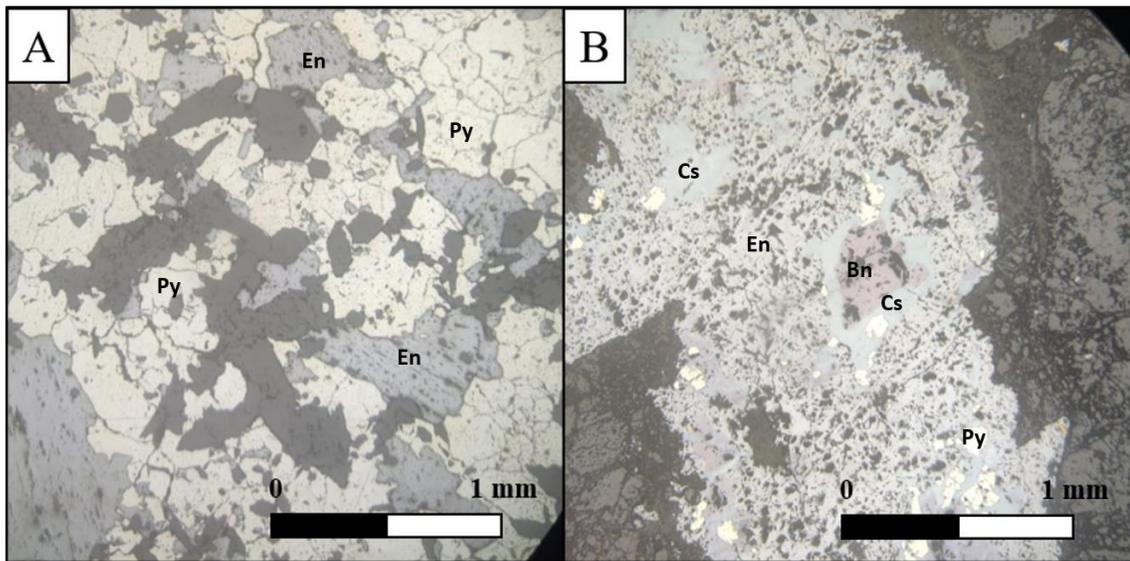
Se observaron de manera muy local cristales de covelina de tamaño micrométrico, estos cristales son de forma anhedral y se aprecian de manera diseminada (Fotomicrografía 4.6), asociada a calcosina.



Fotomicrografía 4.6. Covelina en muestra en estudio. Muestra M-16 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 20x, pequeño grano de covelina junto con pirita.

4.4.1.7. Enargita

Los cristales de enargita se observan comúnmente con forma subhedral, y en menor grado, euhedral y anhedral (Fotomicrografía 4.7), se encuentra principalmente rellenando espacios, tanto en vetillas como en microfracturas, en vetillas es común observarla asociada principalmente a pirita, digenita y calcosina, también se observa formando cúmulos con sulfuros de cobre, y a pesar de encontrarse la mayoría de las veces alrededor de estos minerales, no queda claro si hay una textura de reemplazo, pero si hay una apariencia de que fuera posterior a estos, finalmente es posible observar de manera diseminada en el corte, con granos bien formados, por lo general en esta ocurrencia se encuentra con pirita. Sus tamaños son variados, presentando granos micrométricos a milimétricos que cubren gran parte del corte.



Fotomicrografía 4.7. Enargita en las muestras en estudio. (A) Muestra M-10 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 5x, cristales de enargita diseminados en el corte en conjunto con pirita. (B) Muestra M-23 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 5x, enargita en vetilla recta y continua junto con pirita, calcosina y bornita.

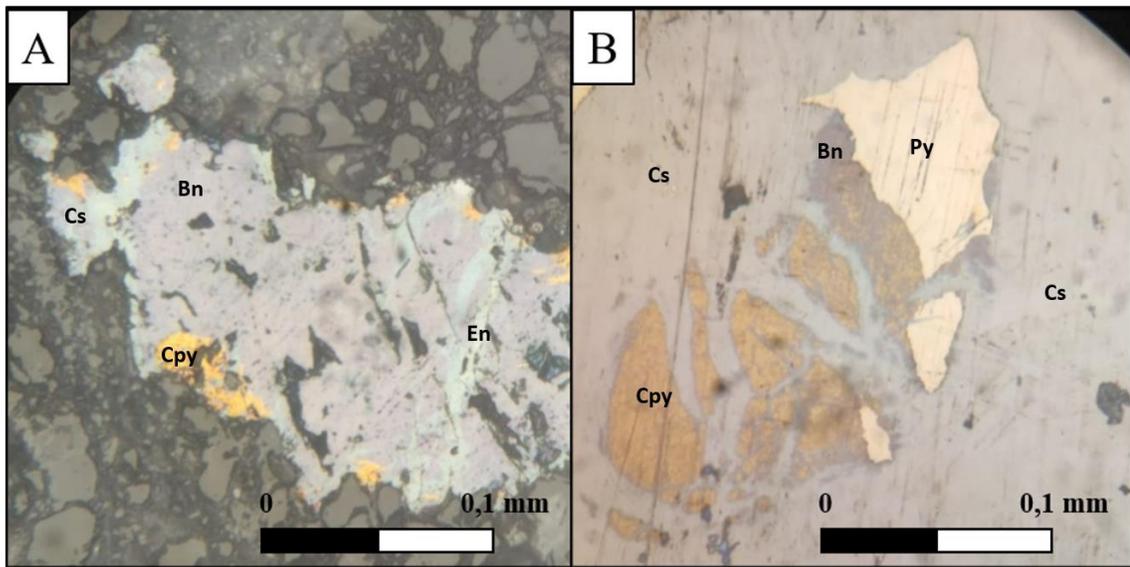
4.4.2. Asociaciones Minerales

En el estudio calcográfico se observan principalmente minerales portadores de cobre como bornita, calcopirita, calcosina, covelina, digenita y enargita, este último, es el principal portador de arsénico en el área de estudio, es por esto, la importancia de conocer las asociaciones minerales existentes en las Fases de estudio y observar de manera detallada la textura y forma de los minerales, con el fin de establecer una relación de temporalidad entre estos.

A continuación, se describen las asociaciones de minerales más comunes de la Fase 11 y 13, estas relaciones son similares, por lo que no se hace diferencia entre una Fase con respecto a la otra.

4.4.2.1. Asociación Calcopirita-Bornita

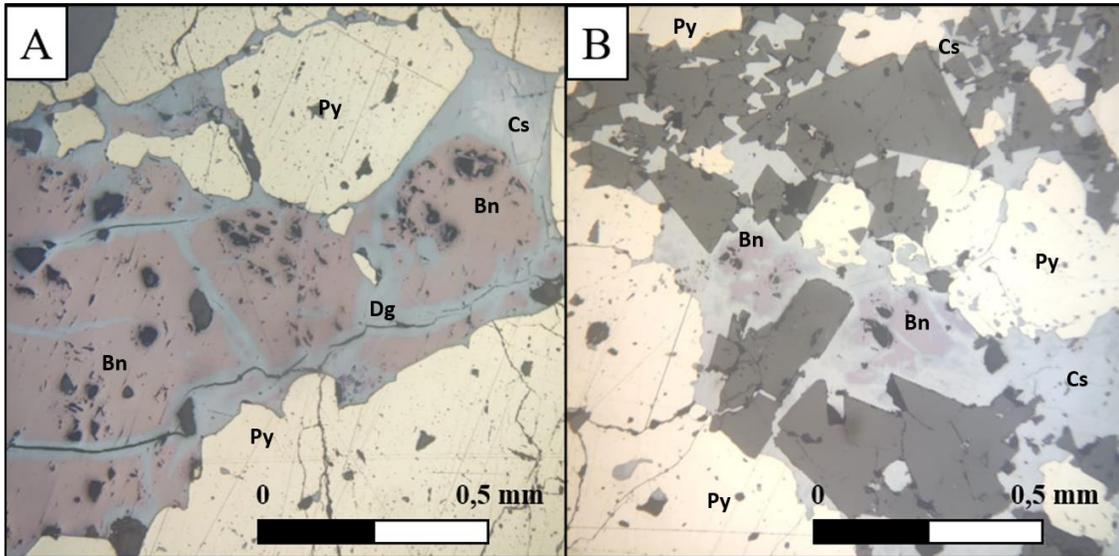
Es una de las asociaciones más típicas dentro de la zona de mineralización primaria, es posible observarla con mayor claridad en las muestras M-03, M-17 y M-23. Las relaciones texturales entre estos dos minerales muestran mayoritariamente una textura de reemplazo en debilidades y en borde de los cristales (Fotomicrografía 4.8), esto es más notorio en la Fase 11, ya que en la Fase 13 solo se observan vestigios de estos minerales.



Fotomicrografía 4.8. Asociación calcopirita-bornita. (A) Muestra M-23 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 50x, bornita reemplazando a calcopirita, se observa en conjunto con enargita y calcosina relleno de espacio. (B) Muestra M-17 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 50x, relictos de bornita reemplazando a calcopirita, que a su vez está siendo reemplazada por calcosina.

4.4.2.2. Asociación Bornita-Calcosina-Digenita

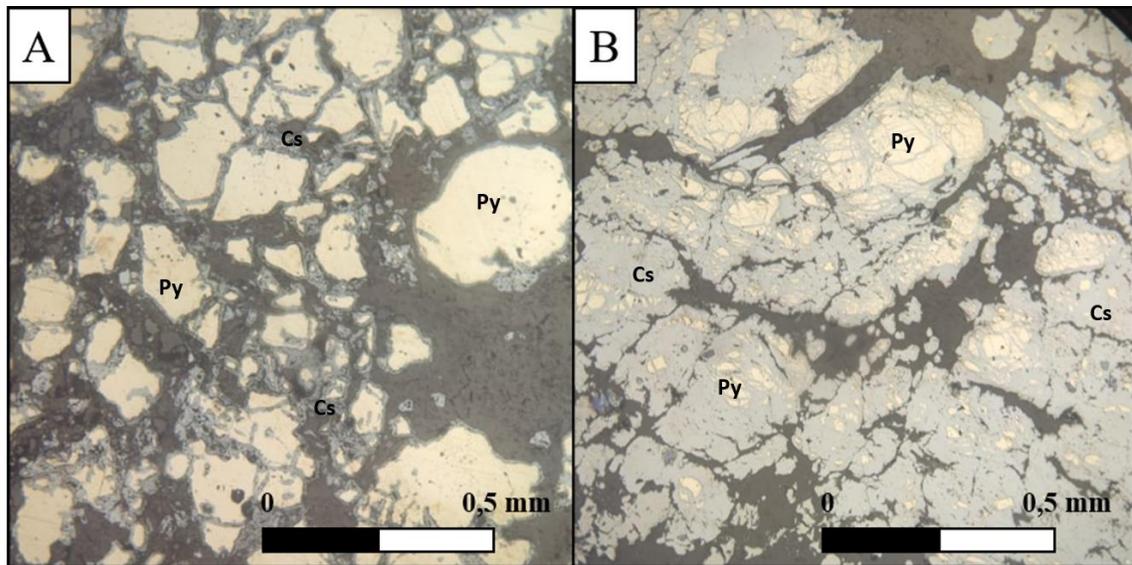
Corresponde a una asociación común de encontrar en los cortes, tanto la calcosina como la digenita se encuentran reemplazando a la bornita ya sea en algunos bordes del cristal o completamente alrededor de esta, así como también en debilidades que presenta este mineral, esta asociación se presenta tanto en cúmulo como en vetilla. Existe un reemplazo parcial en la mayoría de los casos (Fotomicrografía 4.9), aunque en algunos cortes solo se llegan a ver pequeños vestigios de bornita, lo que indica claramente que esta es anterior a los otros minerales de cobre antes mencionados.



Fotomicrografía 4.9. Asociación bornita-calcosina-digenita. (A) Muestra M-10 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 10x, calcosina y digenita reemplazando parcialmente a bornita en cúmulo de minerales en conjunto con pirita. (B) Muestra M-22 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 10x, calcosina reemplazando a bornita, ambos minerales se encuentran de manera diseminada en el corte.

4.4.2.3. Asociación Pirita-Calcosina

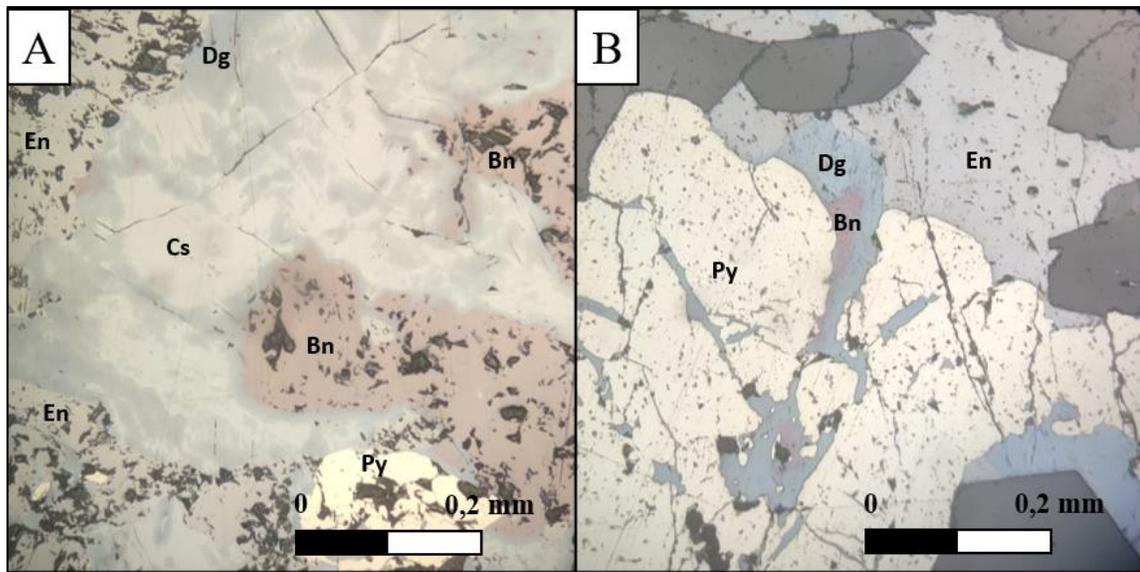
A pesar de que la pirita se observa en la mayoría de los cortes pulido-transparentes, no en todos es clara la relación con los otros minerales, solo se ve como relleno de espacios, sin embargo hay algunos en los que sí presenta una clara asociación, y esta ocurre con calcosina (Fotomicrografía 4.10), estos cortes (M-17, M-21, M-24) contienen prácticamente solo estos dos minerales metálicos, en algunos se observa como si la calcosina envolviera a la pirita, como una especie de anillo alrededor de este mineral, en otros, el corte está casi completamente ocupado por calcosina y hay algunos granos de pirita dentro de esta gran masa, tanto en la Fase 11 como en la Fase 13 se aprecia esta asociación, y en la mayoría la pirita se encuentra fragmentada.



Fotomicrografía 4.10. Asociación pirita-calcosina. (A) Muestra M-21 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 10x, calcosina envolviendo a granos de pirita diseminados. (B) Muestra M-22 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 10x, pirita fragmentada dentro de granos de calcosina.

4.4.2.4. Asociación Enargita-Bornita-Calcosina-Digenita

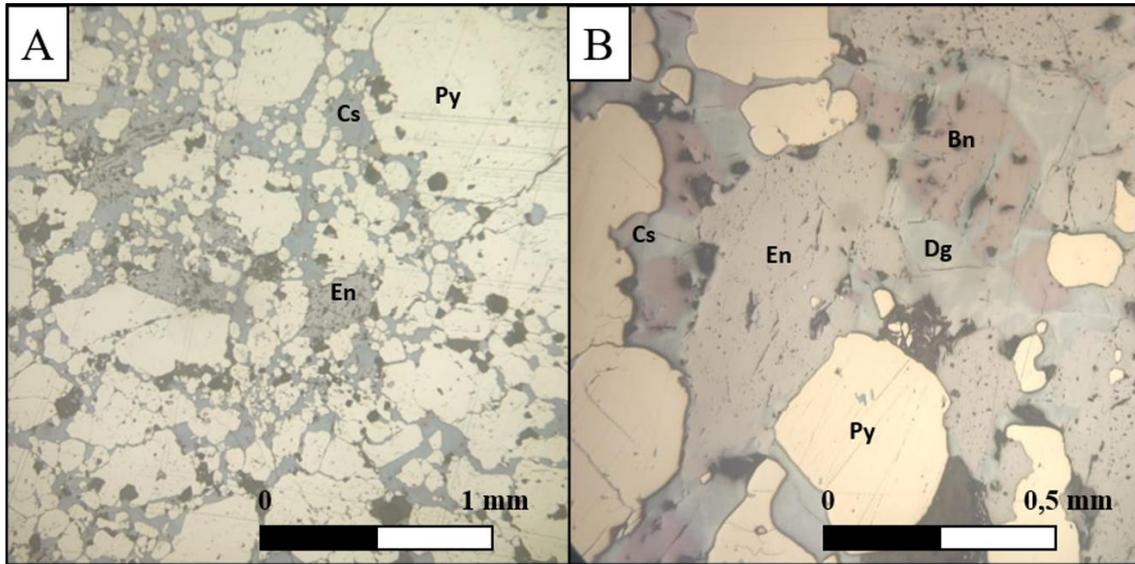
La enargita se observa alrededor y en borde de la asociación Bornita-Calcosina-Digenita (Fotomicrografía 4.11), como parte de un evento posterior, aprovechando fracturas de la roca y microfracturas de los minerales que precipitaron tempranamente, no es clara una textura de reemplazo porque se observan los bordes claros de los sulfuros secundarios de cobre. Esto es posible observarlo claramente en las muestras M-06, M-10, M-11 y M-23, todas correspondientes a la Fase 11, y a menor escala, es también posible apreciarlo en los cortes pulido-transparentes M-17, M-21, M-22 y M-24. Es posible distinguir esta asociación tanto en vetillas milimétricas continuas y rectas, así como también en cúmulos con estos mismos minerales, en este tipo de ocurrencia se observa tanto masiva como en cristales bien formados.



Fotomicrografía 4.11. Asociación enargita-bornita-calcosina-digenita. (A) Muestra M-11 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 20x, cúmulo de calcosina y digenita reemplazando a bornita y enargita envolviendo esta asociación. (B) Muestra M-10 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 20x, enargita en bordes de digenita que se encuentra reemplazando a bornita.

4.4.2.5. Asociación Enargita-Pirita

Durante la etapa hidrotermal tardía del yacimiento Rosario, los fluidos que precipitaron pirita lo hicieron a través de fracturas y microfracturas, aprovechando las discontinuidades de los eventos hidrotermales anteriores. La pirita se sobrepone a la enargita, siendo posterior a esta última, esto es posible observarlo en la Fotomicrografía 4.12. es posible observar solos estos dos minerales de manera diseminada en el corte, así como también en conjunto con otros minerales en cúmulos y en vetillas, aunque sin una relación clara. El fuerte control sobre debilidades que tienen ambos minerales es posible observarlo de manera clara en los análisis QUEMSCAN de las muestras M-06, M-10, M-11, M-21, M-22, M-23 y M-24 del Anexo 3.



Fotomicrografía 4.12. Asociación enargita-pirita. (A) Muestra M-11 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 5x, granos de pirita y enargita diseminados en masa de calcosina. (B) Muestra M-06 en Luz Reflejada, Nícoles Paralelos y Aumento 10x, granos de pirita con bordes bien definidos sobre enargita en cúmulo de minerales.



5. DISCUSIONES

5.1. Temporalidad de los Sulfuros de la Fase 11 y 13

La formación de minerales en este tipo de depósito ocurre a partir de fluidos magmáticos e hidrotermales ricos en elementos como cobre, hierro, arsénico, etc. Estos fluidos, dependiendo principalmente de su temperatura y pH, alteran la roca preexistente dando lugar a la precipitación de los variados tipos de sulfuros. Un indicador de la temporalidad en la formación de los minerales, son las relaciones texturales entre ellos y los datos de geotermometría.

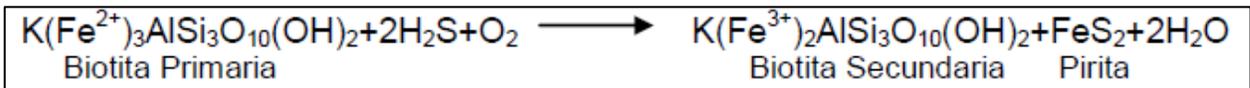
La paragénesis mineral es la asociación de varias fases minerales estables en un mismo intervalo de presión y temperatura. Conociendo esta, podemos saber las condiciones de presión y temperatura a la que ha estado sometida la roca.

La temporalidad de los sulfuros en el área de estudio se dedujo a partir de cortes pulido-transparentes, con énfasis principalmente en las relaciones texturales entre los minerales y las texturas que presentaban las menas cuando se observaban como monominerales. Las relaciones texturales entre minerales proveen argumentos consistentes para establecer una secuencia paragenética (Barnes, 1967; Ramdohr, 1969; Spry, 1969; Bard, 1980 en Payauna, 2012).

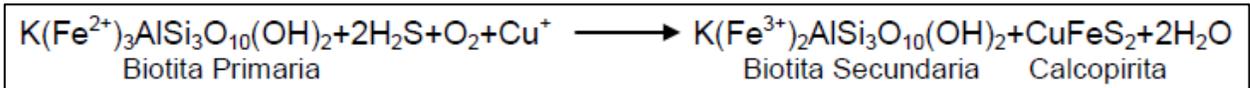
5.1.1. Formación de Sulfuros en la Etapa Tardimagmática

5.1.1.1. Formación de Pirita y Calcopirita

La formación de pirita y calcopirita ocurre durante la alteración potásica, propilítica y principalmente en la transición y desarrollo de la alteración cuarzo-sericita (Payauna, 2012). En este estudio las muestras afectadas por la alteración propilítica corresponde a M-01 y M-07, en ambos cortes pulido-transparentes los únicos minerales de mena observados corresponden a pirita y calcopirita, ambos se encontraban de manera diseminada y en vetillas. En el caso de las alteraciones potásica y propilítica, estos minerales se pueden formar a partir de biotitas primarias, que al reaccionar con el azufre (ácido sulfhídrico) disuelto en la solución, originan biotitas secundarias y pirita (Payauna, 2012) como se puede observar en la siguiente reacción:



Si la solución se encontrara sobresaturada en cationes de Cu^+ , es posible formar calcopirita:

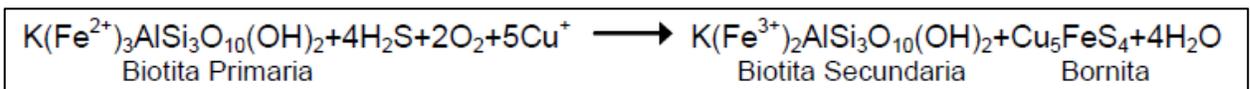


Dilles y Einaudi (1992) en Rusk y otros (2008) concluyen que la precipitación de la calcopirita ocurre a altas temperaturas durante la alteración potásica, esto es concordante con lo observado en este estudio, debido a que las muestras principalmente están afectadas por las alteraciones argílica intermedia y argílica avanzada, y en menor grado, propilítica y fílica, y en general no se pudo observar un buen desarrollo de esta mena, sin embargo, se pudo distinguir calcopirita siendo reemplazada por otros minerales que abundan en estos dominios, por lo que se infiere que la zona de calcopirita del yacimiento esta inserto en la alteración potásica, lo que fue corroborado en la base de datos de sondajes del yacimiento Rosario.

La relación textural observada en este estudio entre la pirita y calcopirita es de entrecrecimiento, lo que indica que probablemente estos minerales sean contemporáneos.

5.5.1.2. Formación de Bornita

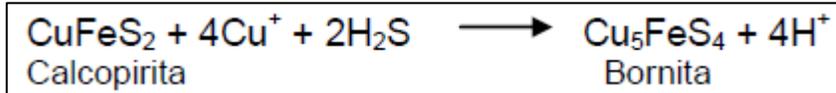
La formación de bornita, al igual que la calcopirita y pirita, ocurre durante el proceso de alteración potásica. Según Rojas y Morgado (2004) este mineral en la alteración potásica se forma a partir de biotitas primarias bajo condiciones de altos contenidos de ácido sulfhídrico en solución, y alta concentración de cationes Cu^+ , se origina de la siguiente manera:



5.1.2. Formación de Sulfuros en la Etapa de Transición

5.1.2.1. Formación de Bornita

De acuerdo con Payauna (2012) es probable que se forme bornita se forme también a partir de calcopirita, bajo condiciones de alta concentración de cationes Cu^+ junto con un aumento en la actividad del azufre, que se presenta como ácido sulfhídrico:



A partir de estas relaciones es posible determinar que la bornita puede precipitar en forma simultánea con calcopirita o bien, formarse a partir de este mineral, esto es concordante debido a las relaciones mineralógicas vistas en este estudio, ya que cuando se observa la calcopirita con la bornita, solo se observan vestigios del primero, siendo común encontrar bornita reemplazando a la calcopirita en los bordes y microfracturas del cristal. Con estas consideraciones paragenéticas se deduce, además, que la bornita es posterior a la formación de la piritita de la etapa tardimagmática.

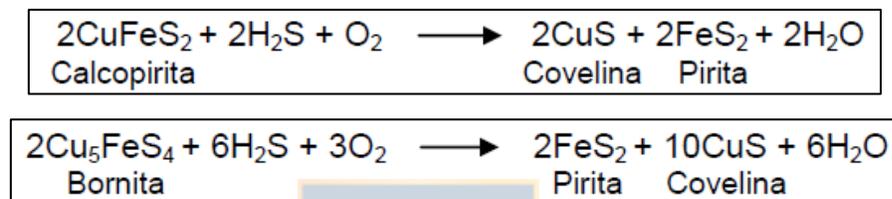
5.1.2.2. Formación de Calcosina y Digenita

La calcosina y digenita, ocurren en exsolución con bornita, producto de la sobresaturación en Cu^+ de los fluidos. La temperatura en la que coexiste bornita con digenita fluctúa entre 265°C a 83°C dependiendo de la composición de la digenita, mientras que para el caso de bornita con calcosina las temperaturas van de 265°C a 103°C (Ramdohr, 1969 en Payauna, 2012). Estos datos de temperatura junto con las observaciones de relaciones texturales realizadas nos indican que ambos minerales son posteriores a la bornita, ya que en todos los casos se observó un reemplazo parcial tanto en borde como en microfracturas del cristal como se observa en las muestras que presentan estos minerales y, además, se infiere que por ende también son posterior a la calcopirita y piritita de la etapa tardimagmática.

5.1.3. Formación de Sulfuros en la Etapa Hidrotermal Principal

5.1.3.1. Formación de Pirita

La hidrólisis que ocurre en las alteraciones posteriores afecta a los minerales de ganga de las rocas preexistentes y también actúa sobre los sulfuros, generando una liberación de los cationes Fe^{2+} y Cu^+ a la solución, los cuales tienden a precipitar nuevamente en fases más estables y concentradas, formando altos contenidos de pirita, acompañado de covelina. Este proceso que afecta a los sulfuros está acompañado por un aumento de azufre y oxígeno en solución (Payauna, 2012), lo que se explica mediante las siguientes reacciones químicas:



La pirita del evento hidrotermal principal es posterior a la calcopirita y bornita, porque representa el empobrecimiento en Cu^+ y dominio de Fe^{2+} en las soluciones mineralizadoras, los cristales de este mineral presentan formas subhedrales a euhedrales. A partir de esto se podría inferir que existen dos generaciones de formación de pirita, lo que coincide con lo observado en los cortes, donde se distinguen granos de pirita con bordes bien definidos sobre minerales como calcosina, digenita y bornita, indicando que sería posterior a ellos.

5.1.3.2. Formación de Enargita

La presencia de As en depósitos de pórfidos se ve favorecida en zonas de alteración cuarzo-sericita y alteraciones posteriores, las que implican una fuerte hidrólisis de feldespatos, lo que se traduce en una acidificación del medio generando las condiciones propicias para que el As precipite (Martínez, 2013), por lo tanto, la presencia de enargita estaría asociada a una menor temperatura y a una evolución del fluido que genere mayor fS_2 en las zonas de cajas (Suazo, 2010 en Martínez, 2013). La enargita se forma en alteraciones que implican menor temperatura y pH más ácido, esto coincide con la revisión de la base de datos, donde hay una mayor proporción de arsénico en Fases

superior del yacimiento, que están relacionadas más a un ambiente epitermal que de pórfido, cumpliendo con los requisitos que este elemento necesita para precipitar.

De acuerdo a las muestras estudiadas, la enargita se observa principalmente en estructuras, pocas muestras fueron las que permitieron observar este mineral, y la mayoría correspondía a vetas y vetillas, lo que es coincidente con el modelo idealizado de Carrizo y otros (2018) que indica que la fase de vapor rica en As migra hacia arriba en el sistema a través de debilidades de la corteza. En los cortes es posible observar este mineral alrededor o en bordes de la calcosina y/o digenita, lo que podría indicar incluso que habría una textura de reemplazo entre estos minerales, también es posible distinguirlo con la pirita del evento hidrotermal tardío, pero no se aprecia una relación clara. Esto nos demuestra que la enargita se formó posterior a los demás minerales y se infiere que sea contemporánea y/o anterior a la pirita de la etapa hidrotermal tardía, lo que indica que este mineral representa una de las fases posteriores y finales de mineralización hidrotermal.

5.2. Relación del Arsénico con la Litología y la Alteración



5.2.1. Litología

De acuerdo con el capítulo 4.1.2.2.A las litologías con mayor contenido de arsénico de la Fase 11 y 13 del yacimiento Rosario corresponden a BRE, TOB y AND. Si se toma en cuenta el parámetro de porosidad de Sanders (1998) las brechas (BRE) son las rocas más porosas y juegan un rol fundamental en la recepción de este elemento, mientras que las demás unidades, como las tobas (TOB) y andesitas (AND) tienen una porosidad más baja, y su recepción de este elemento está relacionado al intenso fracturamiento asociado a las zonas de daño de las zonas de fallas de estas litologías (Garay, 2021). En este estudio la mayoría de las muestras correspondían a vetas, por lo que no se pudo corroborar microscópicamente lo mencionado anteriormente.

5.2.2. Alteración

Las alteraciones que tienen mayor contenido de arsénico en el área de estudio, de acuerdo con la estadística realizada en el Capítulo 4.1.2.2.B corresponden a la argílica intermedia y avanzada (A), y cuarzo-sericita (QS). Esto concuerda con lo observado en los cortes, ya que las muestras que

presentan mayor contenido de arsénico en su mayoría contienen alteración argílica avanzada. Estas alteraciones hidrotermales juegan un rol importante en la recepción, ya que se presentan en entornos tardíos de pórfidos cupríferos, donde por el continuo enfriamiento puede evolucionar a un líquido con alto estado de sulfuración si se concentra adecuadamente (Sillitoe, 2010; Kouzmanov y otros, 2012), solo se considera que la fase de vapor rica en As puede migrar hacia arriba en el sistema a través de fracturas desarrollada en la corteza superior (Kouzmanov y otros, 2012; Carrizo y otros, 2018) generando la migración hacia otros sectores de menor o mayor permeabilidad (Figura 5.1).

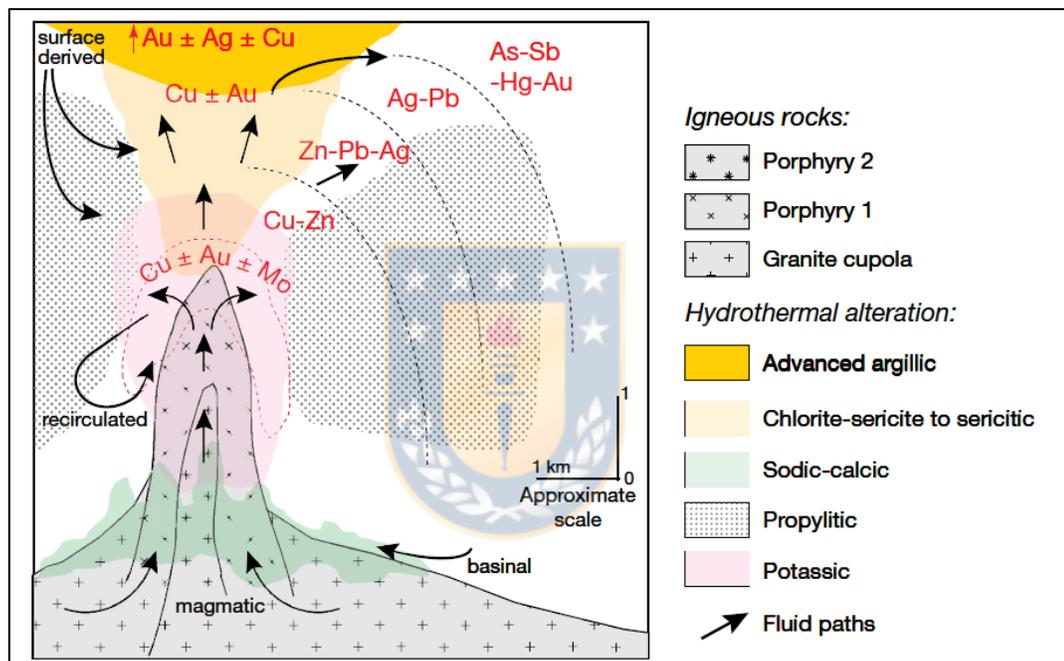


Figura 5.1. Esquema de evolución magmática y precipitación de elementos en un pórfido. Extraído de Kouzmanov y otros (2012).

5.3. Arsénico como Indicador de Falla

De acuerdo con el estudio de Carrizo y otros (2018) el yacimiento Rio Blanco-Los Bronces, el arsénico está estrechamente relacionado a estructuras (Figura 5.2), tal como sucede en el yacimiento Rosario.

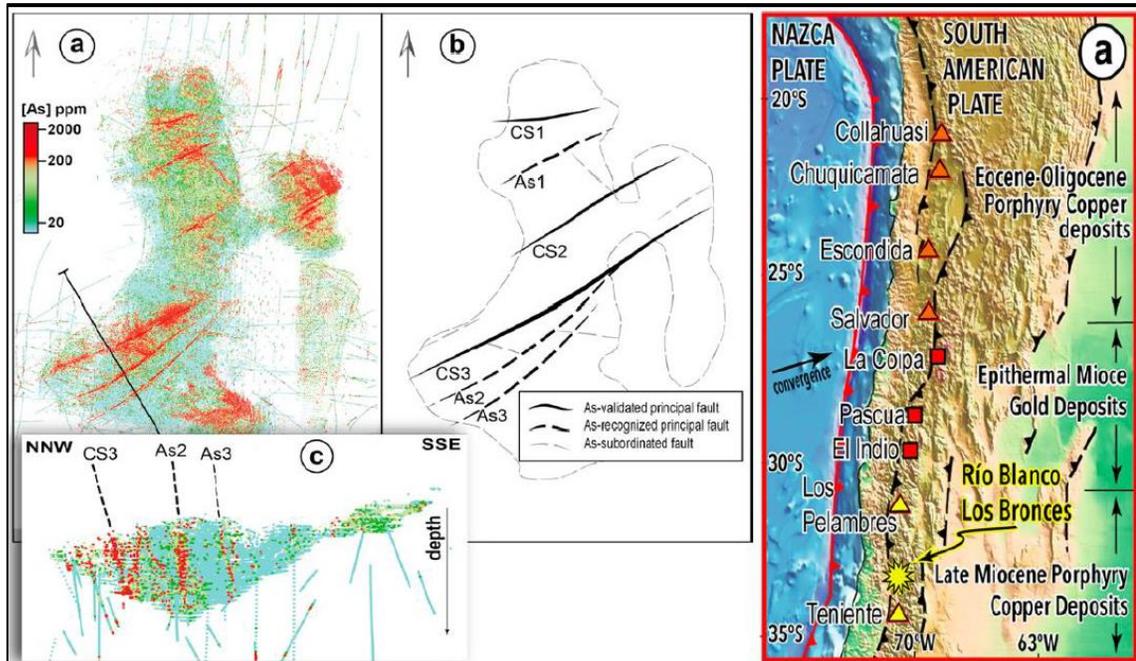


Figura 5.2. Relación entre lineamientos y concentración de arsénico en el yacimiento Río Blanco-Los Bronces. Extraído de Carrizo y otros (2018).

Además, Garay (2021) valida las fallas del yacimiento Rosario mediante el mapeo de bancos y propone que el Yacimiento Rosario y su periferia está delimitado por bloques de falla, los cuales están definidos por fallas que participaron en las últimas etapas del sistema hidrotermal, que permitieron que el arsénico fuera canalizado y que por lineamientos asociados a zonas de daño percolara y migrara (Figura 5.3).

En este estudio, se confirma la fuerte relación que existe entre el arsénico y las estructuras, tal como se describe en detalle en el Capítulo 4.1.3. a partir de las bases de datos en el *software* Leapfrog, donde por medio de geoestadística se concluye que las Fallas Última y Pique poseen un alto contenido de arsénico, en menor medida la Falla Rosario y a medida que la distancia aumenta con respecto a estas fallas, el valor de este elemento disminuye. Esto corrobora que las concentraciones de arsénico podrían ser útiles para definir lineamiento y así ayudar a actualizar el modelo estructural del yacimiento.

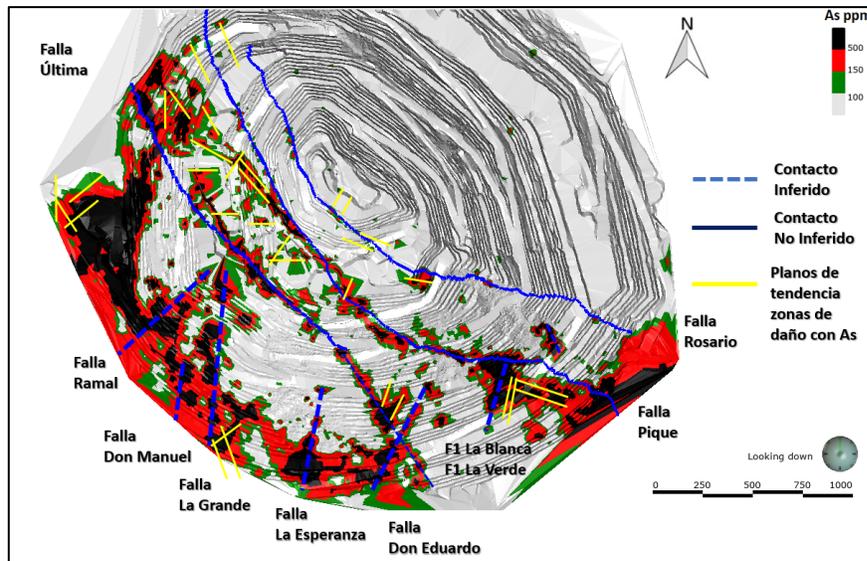


Figura 5.3. Relación entre concentración de arsénico con lineamientos en el yacimiento Rosario. Extraído de Garay (2021).

5.4. Mineralización de Arsénico en Rosario

Según antecedentes, el arsénico en el distrito de Collahuasi se habría remontado en primera instancia al emplazamiento del pórfido Rosario (34.5 ± 0.5 y 32.6 ± 0.3 Ma), lo que ocurre inmediatamente después de la Fase Incaica (Masterman, 2005), lo que implica que fue emplazado cuando la Cordillera de Domeyko sufrió un colapso gravitacional. El deslizamiento gravitacional a lo largo de las fallas normales, como la Falla Rosario, aceleró potencialmente la exhumación y ayudó a promover el *telescoping* del ambiente de alta sulfuración hacia el pórfido de Rosario. La exhumación del sistema de pórfido permitió la superposición de vetas epitermales de sulfuro masivo y alteración argílica avanzada en el núcleo del sistema de pórfido (Cooke y otros, 2005).

La alta presión de fluidos hidrotermales generado por la intrusión del pórfido Rosario y/o por la segunda intrusión (pórfido La Grande), permitieron la canalización de estos fluidos hidrotermales en las zonas frágiles observadas en el inicio de la alteración QS, a través de vetas, fallas y fracturas, lo que generó una mayor debilidad y fracturamiento en las unidades litológicas del yacimiento aumentando la permeabilidad secundaria promoviendo que el arsénico con el cobre percolaran (Ireland, 2010). Esto concuerda con lo observado mediante el análisis realizado en este estudio, donde fue común encontrar mayor concentración de arsénico en estructuras como vetas de sulfuros que cortan las litologías del yacimiento.

Con el continuo enfriamiento del sistema se desarrolló la alteración argílica generando una precipitación o sellado de mineralización con arsénico, con el posterior desarrollo de alteración argílica avanzada al estar en contacto con aguas subterráneas (Sillitoe, 2010).

La enargita observada microscópicamente se encuentra ampliamente asociada a sulfuros como bornita, digenita y calcosina, pero estos últimos están siendo reemplazados a través fracturas y en bordes por el mineral de arsénico, lo que resulta coincidente con el previo entendimiento de las condiciones en que la enargita precipita, es decir es etapas hidrotermales tardías, asociada a alteración argílica intermedia y argílica avanzada.



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Como mineral portador de arsénico solo se observó de manera macroscópica y microscópica enargita, no fue posible reconocer escorodita y es posible que existiera tennantita pero en muy baja proporción, lo que no permitió distinguirla mediante los métodos mencionados. Además, la SIP ocupada en el análisis QEMSCAN no permitió detectar la presencia de estos minerales, por lo que sería recomendable realizar otro tipo de análisis que permita diferenciar ambas especies.

- Al contrario de lo que se obtuvo a partir de la estadística, la proporción de enargita vista en los cortes y en el QEMSCAN en las muestras de la Fase 13 fue muy baja comparativamente con las de la Fase 11, lo que podría indicar que las muestras no fueron representativas, esto se debe a que las muestras de la Fase 13 se obtuvieron a partir de bancos superiores, en cambio las de la Fase 11 ya estaba en desarrollo, a mayores profundidades.

- A partir del análisis QEMSCAN se determina que solo 9 muestras de las 15 contienen enargita, y es especialmente importante en las muestras M-06, M-10, M-11 y M-23, dentro de estas, la que menor contenido de arsénico presenta es la M-10 con 3,03% en peso, todas estas pertenecen a la Fase 11, sin embargo, en la Fase 13 también fue posible observar algunos granos de enargita en microscopio en los cortes.

- Las litologías con mayor contenido de arsénico según la estadística son brecha, toba, andesitas y unidades sedimentarias, posiblemente por la porosidad intrínseca y/o por el fracturamiento que estas presentan, lo que permite el ingreso de fluido y con esto también el arsénico. Aunque esto no pudo ser reconocido en el presente trabajo, ya que la mayoría de las muestras extraídas correspondían a vetas de sulfuros, por lo que hubiera resultado mejor haber extraído más muestras de litologías para poder verificar lo que indicaba la estadística.

- La concentración de arsénico aumenta en las muestras en las que predomina la alteración argílica intermedia y avanzada, lo que es coherente con el modelo de Kouzmanov (2012) debido a que, en este tipo de ambiente, es en las alteraciones tardías donde precipita el arsénico.

- Las fallas principales del yacimiento tienen un fuerte control en la mineralización del arsénico, lo que se evidencia en los gráficos confeccionados distancias vs concentración en ppm, en donde al acercarse a la falla la concentración de este elemento aumenta. La falla que mayor contenido de arsénico posee es la Falla Última, luego la Falla Pique y por último la Falla Rosario.

- No es posible observar diferencias en la ocurrencia, textura ni asociaciones de la enargita entre las muestras de la Fase 11 y la Fase 13.

- De manera general, es posible observar la enargita diseminada en granos bien formados y asociada a pirita principalmente en este tipo de ocurrencia, también se distingue en cúmulos en conjunto a bornita, calcopirita, calcosina, digenita y pirita en muestras que corresponden a vetas de sulfuros.

- Las texturas en las que es posible observar la enargita es tanto de relleno como de reemplazo, en cuanto a la primera se distingue relleno de espacio en vetillas y fracturas tanto como granos aislados o asociada a otros minerales. También es posible apreciarla reemplazando a digenita y calcosina por los bordes y microfracturas de los cristales, lo que indica que la formación de la enargita representa una de las fases posteriores de mineralización hidrotermal.

- Los minerales como calcopirita, bornita, digenita y calcosina se forman a partir de otros a partir de procesos químicos, mientras que la enargita y pirita tardía se precipitan principalmente a partir de fluidos en fracturas, esto coincide con su alta concentración en estructuras como vetas y en las fallas principales.

- La enargita se forma en una etapa hidrotermal tardía, cuya composición del fluido es de alta sulfidización, lo que es coherente con una sobreimposición epitermal sobre el ambiente de pórfidos, es por esto la alta concentración de arsénico en el área de estudio en comparación con la Fase 10, o Fases anteriores que el ambiente era más de pórfido.

7. REFERENCIAS

- AURUM CONSULTORES. 2009. Estudio Geológico-Metalogénico Distrito Collahuasi, Informe Final etapa II. Levantamiento Geológico y Metalogénesis, a escala 1:50.000 y 1:25.000 (Inédito): 4 pp. Santiago.
- BISSO, C. B.; DURAN, M. & GONZALES, A. 1998. Geology of the Ujina and Rosario copper porphyry deposits, Collahuasi district, Chile. In Porter, T.M. (eds) *Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits: A global perspective*. PGC Publishing: 217-232. Adelaida.
- BUNDSCHUH, J.; PÉREZ A. & LITTER A. 2008. Distribución del Arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana. Editado por CYTED: 33-39 pp. Argentina.
- CAINE, J. S.; EVANS, J. P. & FORSTER, C. B. 1996. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*. Vol. **24**, (11): 1025-1028.
- CAMUS, F. 2003. Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería: 267 pp. Santiago.
- CARRIZO, D.; BARROS, C. & VELASQUEZ, G. 2018. The Arsenic Fault-Pathfinder: A Complementary Tool to Improve Structural Models in Mining. *Minerals*. Vol. **8**, (9): 364.
- CHARRIER, R.; PINTO, L. & RODRÍGUEZ, M. 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile (Moreno, T. y Gibbons, W. editores). *The Geology of Chile*, Geological Society: 21-114. Londres.
- CMDIC. 2014. Modelo de Recursos Minerales 2014. Informe Inédito: 76 pp. Iquique.
- CMDIC. 2015. Procedimiento Mapeo de Sondajes Sector Rosario Collahuasi. Informe Inédito: 27 pp. Iquique.

- COOKE, D. R., MASTERMAN, G. J., BERRY, R. F., & WALSHE, J. L. 2005. The Rosario porphyry Cu-Mo deposit, northern Chile: Hypogene upgrading during gravitational collapse of the Domeyko Cordillera. *In Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. 365-368 pp. Heidelberg.
- DEL REY, A.; DECKART, K.; ARRIAGADA, C. & MARTÍNEZ, F. 2016. Resolving the paradigm of the late Paleozoic-Triassic Chilean magmatism: Isotopic approach. *Gondwana Research*. Vol. **37**: 172 - 181. Santiago.
- DICK, L. A.; CHAVEZ, W. X.; GONZALEZ, A. & BISSO, C. 1994. Geologic setting and Mineralogy of the Cu-Ag-(As) Rosario Vein System, Collahuasi District, Chile. *SEG Discovery*. Vol. **19**: 1-11.
- FAULKNER, D. R.; JACKSON, C. A. L.; LUNN, R. J.; SCHLISCHE, R. W.; SHIPTON, Z. K.; WIBBERLEY, C. A. J. & WITHJACK, M. O. 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*. Vol. **32**, (11): 1557-1575.
- GARAY, J. 2021. modelamiento estructural de la ocurrencia y distribución del arsénico en el yacimiento rosario, distrito collahuasi, región de Tarapacá, Chile. Universidad Andrés Bello, Departamento de Ciencias de la Ingeniería (Inédito): 213 pp. Iquique.
- GÜNTHER, A.; HASCHKE, M.; REUTTER, K.J. & SCHEUBER, E. 1997. Repeated reactivation of an ancient fault zone under changing kinematic conditions: The Sierra de Moreno fault system (SMFS) (N-Chilean Precordillera). Congreso Geológico Chileno N° 8. Actas **1**: 45-89 pp. Antofagasta.
- IRELAND, T. 2010. Geological Framework of the Mineral Deposits of the Collahuasi district, Región de Tarapacá, Chile. Ph.D. Thesis, University of Tasmania: 414 pp. Hobart.

- KOUZMANOV, K.; POKROVSKI, G. S.; HEDENQUIST, J. W.; HARRIS, M. & CAMUS, F. 2012. Hydrothermal controls on metal distribution in porphyry Cu (-Mo-Au) systems. *Society of Economic Geologists Special Publication*. Vol. **16**: 573-618.
- MAKSAEV, V.; MUNIZAGA, F.; ZENTILLI, M. & CHARRIER, R. 2009. Fission track thermochronology of Neogene plutons in the Principal Andean Cordillera of central Chile (33-35 S): Implications for tectonic evolution and porphyry Cu-Mo mineralization. *Andean Geology*. Vol. **36**, (2): 153-171.
- MARTÍNEZ, C. 2013. Caracterización mineralógica, química y dominios minerales asociados al arsénico, Yacimiento Río Blanco, División Andina, CODELCO-Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Mineralogía Aplicada, mención Geometalurgia. Universidad de Concepción (Inédito): 152 pp. Concepción.
- MASTERMAN, G. 2003. Structural and geochemical evolution of the Rosario Cu-Mo porphyry deposit and related Cu-Ag veins, Collahuasi district, northern Chile: Unpublished Ph.D. thesis, University of Tasmania: 253 pp. Tasmania.
- MASTERMAN, G. J.; COOKE, D. R.; BERRY, R. F.; WALSH, J. L.; LEE, A. W. & CLARK, A. H. 2005. Fluid chemistry, structural setting, and emplacement history of the Rosario Cu-Mo porphyry and Cu-Ag-Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile. *Economic Geology*. Vol. **100**, (5): 835-862.
- MASTERMAN, G.; COOKE D.; BERRY R.; CLARK A.; ARCHIBALD, D.; MATHUR, R.; WALSH, J. & DURÁN, M. 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Re-Os Geochronology of Porphyry Copper-Molybdenum Deposits and Related Copper-Silver Veins in the Collahuasi District, Northern Chile. *Economic Geology*. Vol. **99**: 673-690 pp.
- MPODOZIS, C & RAMOS, V. A. 2008. Tectónica Jurásica en Argentina y Chile: extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. Vol. **63**, (4): 481-497.

- MÜNCHMEYER, C.; HUNT, J. & WARE, H. 1984. Geología del distrito de Collahuasi y del pórfido cuprífero Rosario. Informe interno de la compañía, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi: 84 pp. Santiago.
- OLIVEROS, V.; VÁSQUEZ, P.; CREIXELL, C.; LUCASSEN, F.; DUCEA, N.; CIOCCA, I.; GONZÁLEZ, J.; ESPINOZA, M.; SALAZAR, E.; COLOMA, F. & KASEMANN, S. 2020. Lithospheric evolution of the Pre-and Early Andean convergent margin, Chile. *Gondwana Research*. Vol. **80**: 202 - 227.
- OYARZÚN, G. 2010. Caracterización estructural del yacimiento Rosario Oeste, distrito Collahuasi, I Región de Tarapacá, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 148 pp. Concepción.
- PADILLA GARZA, R. A.; TITLEY, S. R. & PIMENTEL B., F. 2001. Geology of the Escondida porphyry copper deposit, Antofagasta Region, Chile. *Economic Geology*. Vol. **96**: 307-324.
- PAYAUNA, K. 2012. Mineralogía de la fase sulfurada del Yacimiento Radomiro Tomic (RT) y su relación con su metalogénesis. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 143 pp. Antofagasta.
- QUIERO, F.; TASSARA, A.; IAFFALDANO, G. & RABBIA, O. 2022. Growth of Neogene Andes linked to changes in plate convergence using high-resolution kinematic models. *Nature Communications*. Vol. **13**, (1): 1-9.
- QUIROGA, J. 2019. Caracterización y Modelamiento de Vetillas en Rosario, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi S.C.M, Región de Tarapacá, Chile. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Atacama, Departamento de Geología: 61 pp. Copiapó.
- RAMOS, V. A. 2010. The tectonic regime along the Andes: Present-day and Mesozoic regimes. *Geological Journal*. Vol. **45**, (1): 2-25.

- RAMOS, V. A.; JORDAN, T. E.; ALLMENDIGER, R. W.; MPODOZIS, C.; KAY, S. M.; CORTES, J. M. & PALMA, M. A. 1986. Paleozoic terranes of the Central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*. Vol. **5**, (6): 855-880.
- RIQUELME, R.; CÁCERES, A.; CARRASCO, P.; AEDO, L. & SOTO, L. 2014. Control estructural y estimación del arsénico de Rosario. GeoInnova Consultores Limitada. Informe Interno (Inédito). Santiago.
- ROJAS, A. & MORGADO, O. 2004. Caracterización petrográfica y calcográfica de la etapa de alteración y mineralización primaria, del yacimiento de 143 Chuquicamata. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad Católica del Norte, Departamento de Ciencias Geológicas (Inédito): 147 pp. Antofagasta.
- RUDNICK, R.L. & GAO, S. 2003. Composition of the Continental Crust. En: *Treatise on Geochemistry*, Vol 3: The crust (Drever, J.I., Holland, H.D. y Turekian, K.K. editores). Elsevier-Pergamon: 1-64. Oxford
- RUSK, B.; REED, M. H. & DILLES, J. H. 2008. Fluid Inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit, Butte, Montana. *Economic Geology*. Vol. **103**, (2): 307-334.
- SANDERS, L. 1998. A manual of field hydrogeology. Prentice Hall International: 381 pp. Londres.
- SANHUEZA, A.; ALARCÓN, B. & GIGLIO, S. 2006. Proyecto Rosario Oeste. Informe Campaña Exploraciones Fase II: 2005-2006. Gerencia de Exploraciones. CMDIC, Informe Interno (Inédito).
- SANTINI, J. M.; SLY, L. I.; SCHNAGL, R. D. & MACY, J. M. 2000. A new chemolithoautotrophic arsenite-oxidizing bacterium isolated from a gold mine: Phylogenetic, physiological, and preliminary biochemical studies. *Applied and environmental microbiology*. Vol. **66**, (1): 92-97.

- SILLITOE, R. 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*. Vol. **105**, (1): 3 - 41.
- SKARMETA, J. J. 1991. Evolución de cuencas de Trasarco en el norte de Chile: Un Análisis basado en el emplazamiento de diques y filones. Congreso Geológico Chileno N° 6: 649-653. Santiago.
- SMEDLEY, P. L. & KINNIBURGH, D. G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*. Vol. 17, (5): 517-568.
- SOBARZO A. 2010. Geología y distribución de Au y Ag en Rosario Oeste, Distrito Collahuasi. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 121 pp. Concepción.
- STOERTZ, G. & ERICKSEN, G. 1974. Geology of salars in Northern Chile. *U.S. Geological Survey Professional Paper*. Vol. **811**: 1- 65.
- TOMLINSON, A.; BLANCO P.; MAKSAEV V.; DILLES, J.; GRUNDER A. & LADINO M. 2001. Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca-Chuquicamata, Regiones I y II [20°30'-22°30'S]. Servicio Nacional de Geología Minería, Informe Registrado IR-01-20, 444 p. Santiago.
- TSAI, S. L.; SINGH, S. & CHEN, W. 2009. Arsenic metabolism by microbes in nature and the impact on arsenic remediation. *Current Opinion in Biotechnology*. Vol. **20**, (6): 659-667.
- VERGARA, H. 1978. Cuadrángulo Ujina, Región de Tarapacá: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° **33**, mapa escala 1:50.000; 80 pp. Santiago.
- VERGARA, H. L. & THOMAS, A. N. 1984. Hoja Collacagua, Región de Tarapacá: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° **59**, mapa escala 1:250.000: 79 pp. Santiago.

WEIS, P.; DRIESNER, T. & HEINRICH, C. A. 2012. Porphyry-copper ore shells form at stable pressure-temperature fronts within dynamic fluid plumes. *Science*. Vol. 338, (6114): 1613-1616.



ANEXOS

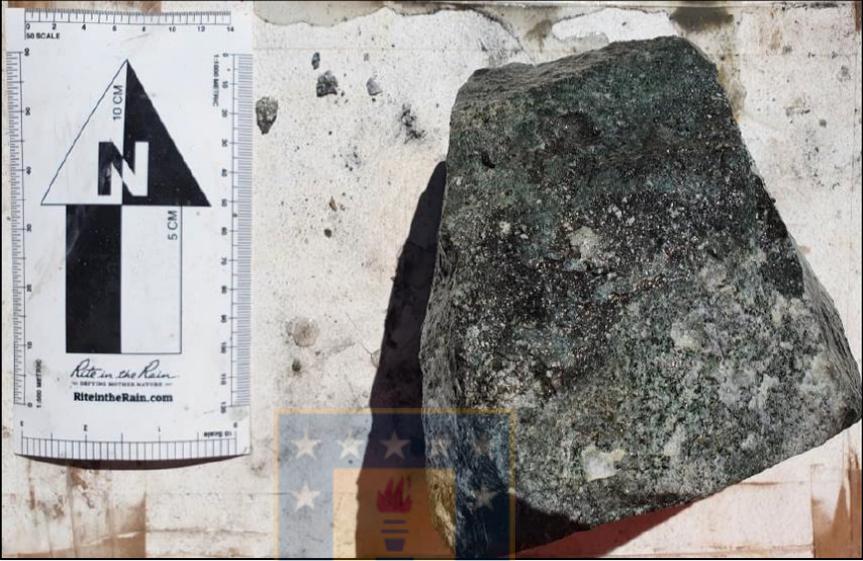


ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
1. Fichas con descripción macroscópica de muestras de mano	88
2. Fichas con descripción microscópica de cortes pulido-transparentes	103
3. Resultados análisis QEMSCAN de muestras en estudio	118
4. Imágenes de Fieldscan, análisis textural	120



ANEXO 1: FICHAS CON DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA DE MUESTRAS DE MANO

Muestra macroscópica 1	M-01	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca de color gris verdoso muy alterada. No se distingue la roca original, la textura está completamente obliterada, solo se distinguen algunos cristales de plagioclasas subhedrales de 1-2 mm, en una masa cloritizada.</p> <p>La alteración que domina es la propilítica, hay gran presencia de clorita en toda la muestra, y como alteración secundaria se observa la alteración argílica de manera localizada en las plagioclasas.</p> <p>Se observan escasas oquedades rellenas con calcita y pirita, el único mineral metálico que se distingue a simple vista es la pirita, la cual se encuentra diseminada.</p> <p>No se observa presencia de ni de enargita ni de otro mineral portador de arsénico.</p>	

Muestra macroscópica 2	M-03	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca de color blanquecino con textura parcialmente obliterada. La muestra presenta relictos de textura porfídica donde se observan fenocristales de cuarzo y plagioclasa, hay gran cantidad de plagioclasas y estas son euhedrales a subhedrales de entre 1 y 5 mm, de color blanco lechoso, mientras que los cristales de cuarzo son de color gris claro translúcido, están fracturados, y presentan tamaños de entre 2 y 10 mm.</p> <p>Presenta alteración argílica como la dominante, esto es más notorio en las plagioclasas.</p> <p>Los minerales metálicos que se observan son pirita y bornita tanto en vetillas como de manera diseminada. Esta muestra es extraída de una veta mayor la cual a simple vista está constituida por 85% de cuarzo y 15% de minerales de cobre con la asociación pirita 60% enargita 30% bornita 5% calcopirita 4% crisocola 1%.</p>	

Muestra macroscópica 3	M-06	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Es una roca de color negro grisáceo, con brillo metálico y textura masiva, no es posible distinguir roca original, la muestra contiene prácticamente solo minerales metálicos, solo se observan unos cuantos cristales de cuarzo.</p> <p>La muestra corresponde a un fragmento de veta que está constituida principalmente por sulfuros y sulfoarseniuros en la siguiente asociación y proporción: pirita 50%, enargita 35%, bornita 10% y digenita 5%. La ley visual estimada de cobre es de 25% CuT.</p> <p>En la muestra se observan agregados de cristales de pirita bien cristalizadas de 1 a 3 mm, de color amarillo latón y hábito cúbico. La bornita y digenita se observa en cúmulos y rellenando intersticios de tamaño milimétrico, la bornita es de color violeta metálico tornasolado y la digenita de color azul celeste metálico.</p> <p>En esta roca si se observa enargita, la cual se encuentra tanto de manera masiva como cristalina, esta última se presenta como cristales grises de hasta 5 mm y hábito prismático con apariencia estriada.</p>	

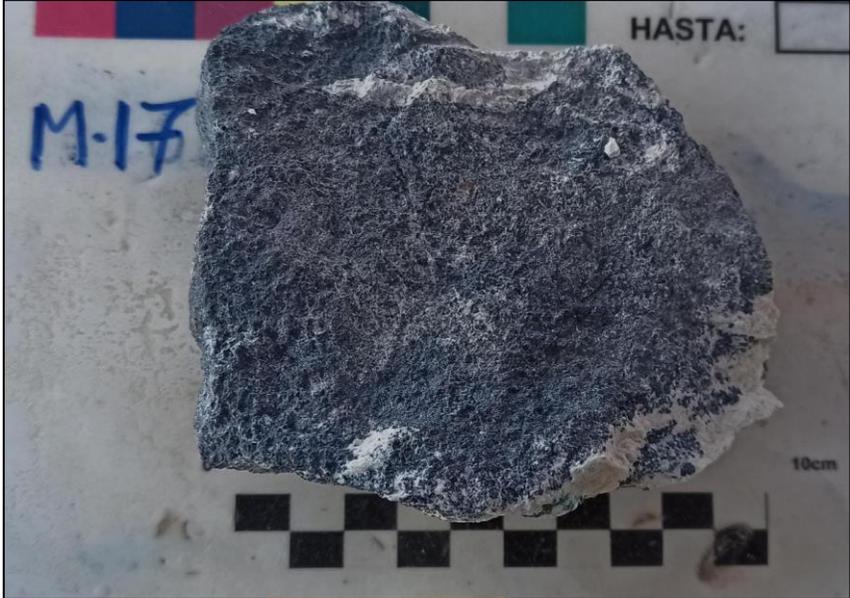
Muestra macroscópica 4	M-07	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca de color amarillo pálido, presenta textura porfídica con aproximadamente 70% de fenocristales y un 30% de masa fundamental altamente cloritizada.</p> <p>La alteración que predomina es la propilítica, y en las plagioclasas es posible distinguir alteración argílica.</p> <p>Dentro de los fenocristales se observa: cuarzo (30%) de color gris claro translucido, la mayoría se encuentran fracturados, y tienen entre 2 y 10 mm; plagioclasas (65%) de color blando lechoso, de formas euhedrales a subhedrales de entre 1 y 5 mm; y biotitas (5%) anhedrales de 1-2 mm muy cloritizadas.</p> <p>Dentro de los minerales metálicos es posible observa pirita y calcopirita en vetillas milimétricas junto con cuarzo, además de pirita fina de manera diseminada en la roca.</p> <p>En esta muestra no fue posible observar enargita ni minerales contenedores de arsénico a simple vista.</p>	

Muestra macroscópica 5	M-10	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca de color grisáceo, no se distingue la roca original ya que se encuentra altamente alterada.</p> <p>Presenta alteración argílica avanzada intensa pervasiva que oblitera completamente la textura original.</p> <p>En cuanto a la mineralización es posible observar algunos cristales de cuarzo, así como también arcillas, además como mineralogía metálica predominada la pirita, aunque también es posible observar bornita, ambos minerales están tanto en vetillas como de manera diseminada.</p> <p>Es posible observar un fragmento de veta con pirita, enargita, dickita y crisocola. La enargita se distingue en vetillas de tamaño milimétrico en conjunto con pirita.</p>	

Muestra macroscópica 6	M-11	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca de color gris azulado, con brillo metálico y textura masiva.</p> <p>La muestra corresponde a un fragmento de veta, no es posible observar minerales translúcidos, ya que se compone casi totalmente de minerales metálicos, por ende, no se puede determinar ni alteración ni textura original.</p> <p>Está constituida principalmente por sulfuros y sulfoarseniuros de cobre en la siguiente asociación y proporción: enargita 45%, pirita 35%, bornita 15% y digenita 5%, la ley visual estimada de cobre es de 35% CuT. Los sulfuros se observan como agregados masivos.</p> <p>Esta roca contiene gran cantidad de enargita y se presenta tanto cristalina como terrosa junto con otros minerales.</p>	

Muestra macroscópica 7	M-14	Fase 13
		
Descripción macroscópica	<p>La muestra es una roca de color gris claro que corresponde a una brecha de falla con matriz de roca molida y arcilla, presenta fragmentos subredondeados y subangulosos de hasta 4 cm, su composición es principalmente andesítica. Predomina la alteración argílica en la roca por la cantidad de arcilla que se distingue.</p> <p>Dentro de los minerales metálicos que es posible observar en la roca está pirita y calcosina, estos minerales se distribuyen en la matriz y en finas vetillas, aunque también están presentes en los fragmentos. La ley visual estimada de cobre es de 13% CuT.</p> <p>No es posible observar enargita en la muestra.</p>	

Muestra macroscópica 8	M-16	Fase 13
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca de color gris azulado, la muestra pertenece a una veta de cuarzo masivo, dentro de los minerales translucidos es posible distinguir gran cantidad de cuarzo y algunas micas.</p> <p>No es posible distinguir claramente una alteración por la poca cantidad de minerales de alteración que se observan, ya que predominan los minerales metálicos.</p> <p>Como minerales metálicos es posible observar gran cantidad de pirita que se encuentra tanto de manera diseminada en la roca, de manera general es posible distinguir vetillas de pirita, calcosina y enargita de hasta de 1cm en la veta de cuarzo masivo, con un total de sulfuros de 15%, de las cuales se tiene pirita 93%, enargita 5% y calcosina 2%.</p> <p>Esta muestra si contiene enargita, esta se observa de manera masiva en la roca y en conjunto con calcosina que se observa de la misma forma.</p>	

Muestra macroscópica 9	M-17	Fase 13
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca de color gris azulado, tiene brillo metálico, y se compone principalmente por sulfuros. La roca se encuentra muy alterada, predominando la alteración argílica avanzada, aunque también se observa una alta cantidad de arcillas principalmente dickita que se encuentra en las oquedades de fracturas.</p> <p>La muestra fue extraída desde una veta constituida principalmente de sulfuros de cobre en la siguiente asociación y proporción: enargita 60%, pirita 30% y calcosina 10%. La ley visual estimada de cobre es de 30% CuT. De manera más específica, la muestra se compone de pirita y calcopirita que se encuentran diseminada en la roca, así como también gran proporción de calcosina que se observa tanto de manera masiva como diseminada en ciertas caras de la muestra, finalmente es posible distinguir ciertos cristales de enargita que se encuentran de forma diseminada en la roca y siempre cercano a otros sulfuros de cobre.</p>	

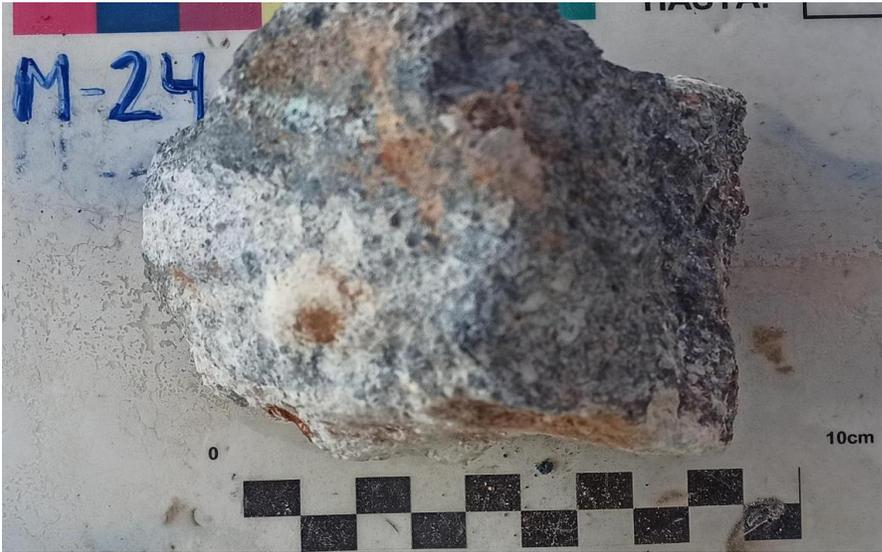
Muestra macroscópica 10	M-18	Fase 13
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una toba de color blanquecino y de color anaranjado en caras alteradas, contiene una gran vetilla, la roca caja tiene una textura completamente obliterada, distinguiéndose solo algunos cristales de cuarzo envueltos en una matriz muy agilizada que se compone de illita y caolín, por ende, la alteración principal corresponde a argílica.</p> <p>La muestra fue extraída desde una zona de mineral mixto donde el total de sulfuros corresponde a un 10%, de los cuales están distribuidos en pirita 15%, enargita 5%, calcosina 80%, y una veta de crisocola de 4 cm que equivale al 3%.</p> <p>En específico para la muestra se observa la crisocola como un halo de una vetilla central de 8 mm rellena de calcosina, pirita y en menor proporción cuarzo. Macroscópicamente no se observa la presencia de enargita.</p>	

Muestra macroscópica 11	M-20	Fase 13
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>La muestra corresponde a una brecha hidrotermal lixiviada de color gris rojizo, es posible observar fragmentos subangulosos de hasta de 3cm, la roca se encuentra latamente alterada, se observa textura vuggy silica, por lo que domina la alteración argílica avanzada, y le sigue la alteración argílica por el contenido de arcillas que contiene la roca.</p> <p>Como minerales se pueden distinguir abundantes limonitas (15%), de las cuales tiene una proporción jarosita 90% y goetita 10%, también algunos óxidos de hierro y unos granos de pirita diseminada.</p> <p>A simple vista esta muestra no contiene enargita, pero se extrajo para determinar si contiene algún otro mineral portador de arsénico.</p>	

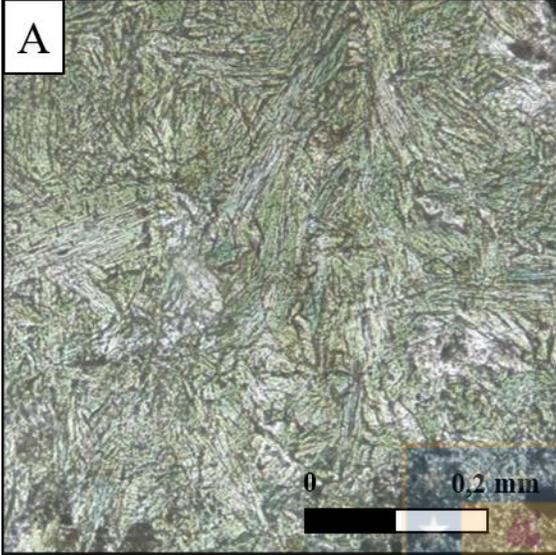
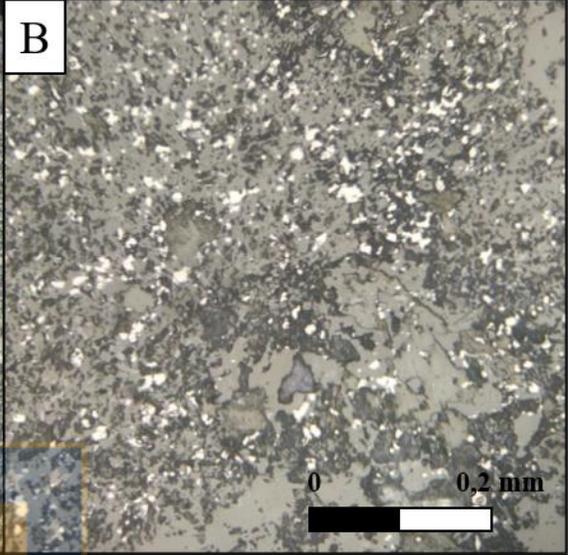
Muestra macroscópica 12	M-21	Fase 13
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>La muestra corresponde a una roca de color gris azulado, se encuentra altamente alterada, la textura original está obliterada y ha sido reemplazada por arcillas, entre ellas pirofilita y en menor proporción dickita, además de sulfuros diseminados.</p> <p>La alteración predominante en la alteración argílica avanzada por los minerales presentes y como alteración secundaria está la argílica.</p> <p>La muestra es extraída desde una veta masiva de pirita, calcosina y enargita, con arcillas relleno oquedades y fracturas, la estimación visual total de sulfuros es de 70%, de los cuales están distribuidos en pirita 80%, calcosina 15% y enargita 5%.</p> <p>De manera específica en la roca es posible observar gran cantidad de pirita la cual se encuentra diseminada, así como también algunos granos de calcopirita, otro mineral que está en gran proporción es la calcosina, la cual se observa de manera masiva en la muestra y tiene un aspecto terroso, por último, en esta roca se logran distinguir algunos granos de enargita los cuales están en conjunto con la calcosina.</p>	

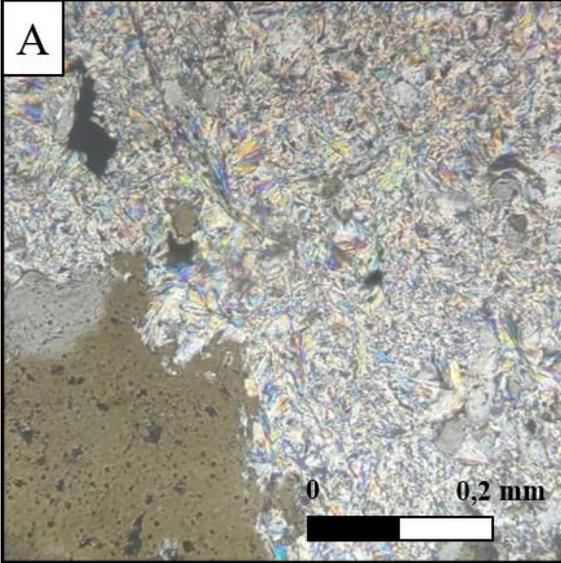
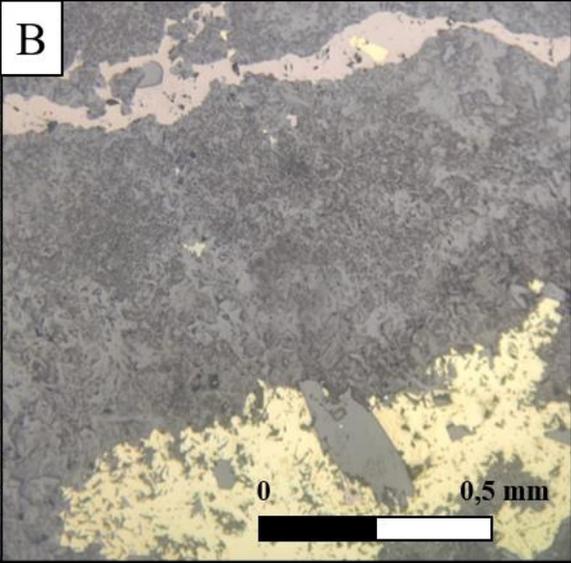
Muestra macroscópica 13	M-22	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca de color gris negruzco, casi en su totalidad está cubierta solo por minerales metálicos, es posible distinguir algunos granos de cuarzo y contiene un poco cantidad de arcillas.</p> <p>La muestra fue extraída desde una veta completamente de sulfuros, era posible observar gran cantidad de pirita masiva y cubica, calcosina de forma masiva, junto con la presencia de enargita en cúmulos hasta 4mm distribuidos en la veta de forma diseminada, también en microvetillas donde el total de sulfuros es del 100%, el cual está distribuido en pirita 93% y enargita 7%, con trazas de calcosina, y no contiene alteración.</p> <p>De manera más específica en la muestra es posible observar gran cantidad de pirita tanto en cúmulo como de manera diseminada, también es posible observar calcosina de forma masiva y muy poca cantidad de granos de enargita, casi indistinguibles juntos con calcosina.</p>	

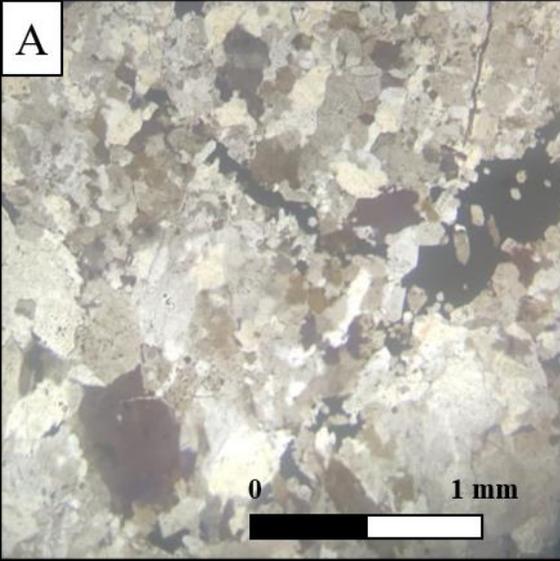
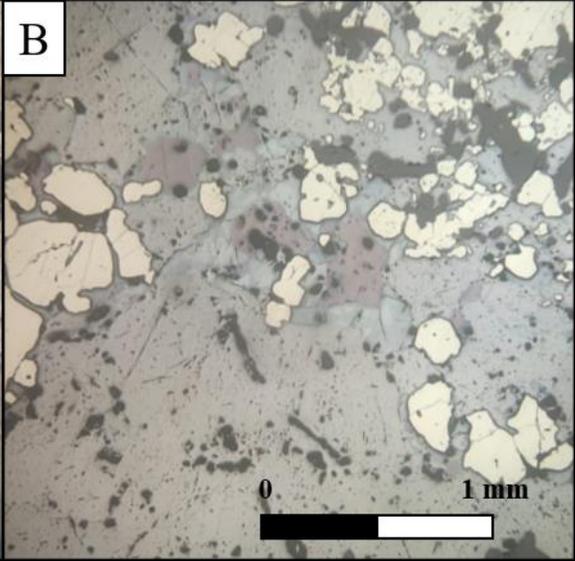
Muestra macroscópica 14	M-23	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca gris blanquecina, es posible observar gran cantidad de cuarzo, arcilla, y también se compone de varias vetillas milimétricas.</p> <p>La muestra se obtuvo de una veta de cuarzo con pirita, que también tiene asociada múltiples vetillas finas de bornita, enargita, y en menor proporción calcosina y calcopirita asociada a la bornita, se encuentra en una zona de mineral primario, con un total de sulfuros de 20%, el cual está distribuido en pirita 58%, bornita 20%, enargita 10%, calcopirita 10 y calcosina 2%.</p> <p>De manera más específica es posible observar en la muestra minerales metálicos que en su mayoría se distribuyen en vetillas milimétricas las cuales contienen gran cantidad de enargita, pirita, calcosina, bornita y unas trazas de calcopirita, esta muestra tiene gran cantidad de enargita, y se distingue claramente una asociación y posible reemplazo con los otros sulfuros de cobre, cuando se encontraba de manera diseminada en la muestra también se encontraba en conjunto con estos minerales.</p>	

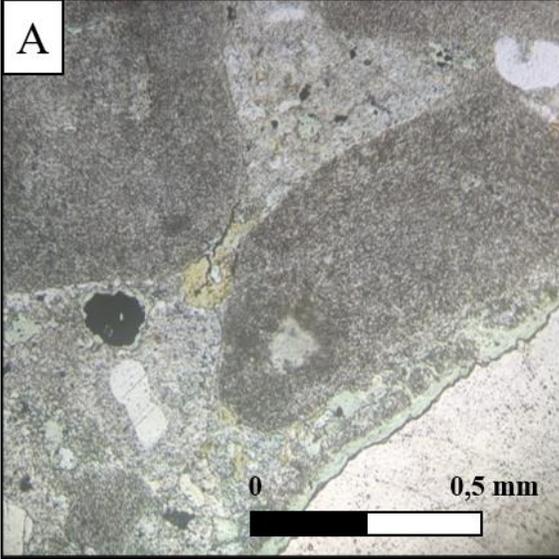
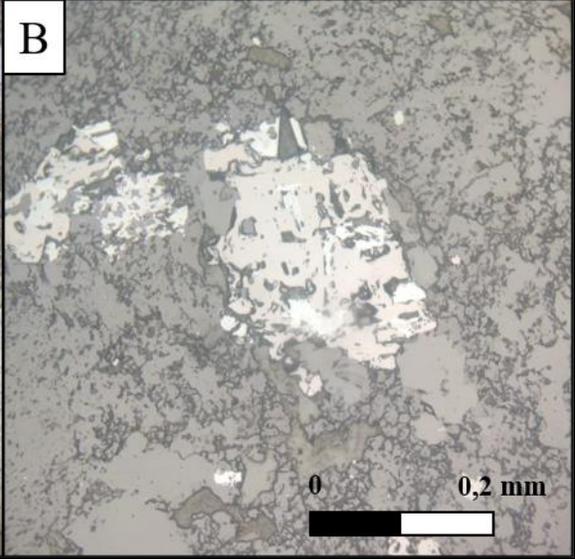
Muestra macroscópica 15	M-24	Fase 11
		
<p>Descripción macroscópica</p>	<p>Corresponde a una roca gris negruzco se encuentra altamente alterada, la textura original está completamente obliterada, predomina la alteración argílica avanzada.</p> <p>La muestra es extraída desde una veta de color gris oscuro que contiene enargita, pirita y calcosina de manera masiva, además presenta un relleno selectivo de arcillas, entre ellas dickita y en menor proporción pirofilita, la estimación visual de total de sulfuros que se observan en la veta es de 60%, de los cuales están distribuidos en pirita 80%, calcosina 5%, y enargita 15%.</p> <p>De manera más específica en la muestra es posible observar algunos granos de cuarzo, así como también arcillas, en su mayoría está cubierta por minerales metálicos, de los cuales se distingue gran cantidad de calcosina esta tiene un aspecto terroso y está de manera masiva en la muestra, también es posible distinguir pirita y calcopirita en forma diseminada y su contenido es bajo, así como bornita y enargita que se encuentran asociadas a la calcosina, es posible observar estos minerales de forma diseminada en la gran masa de calcosina.</p>	

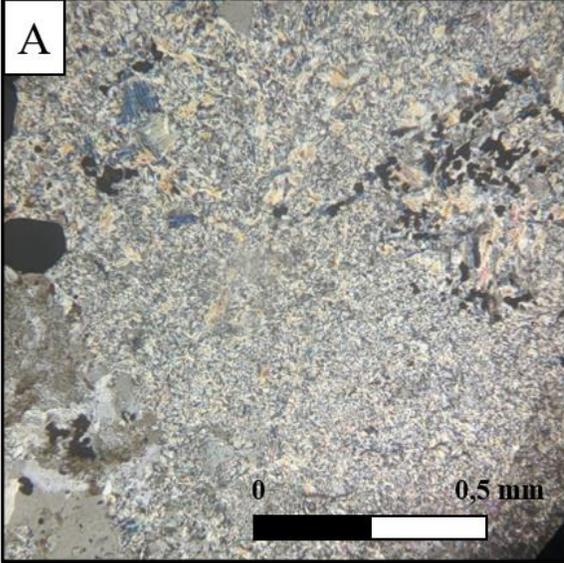
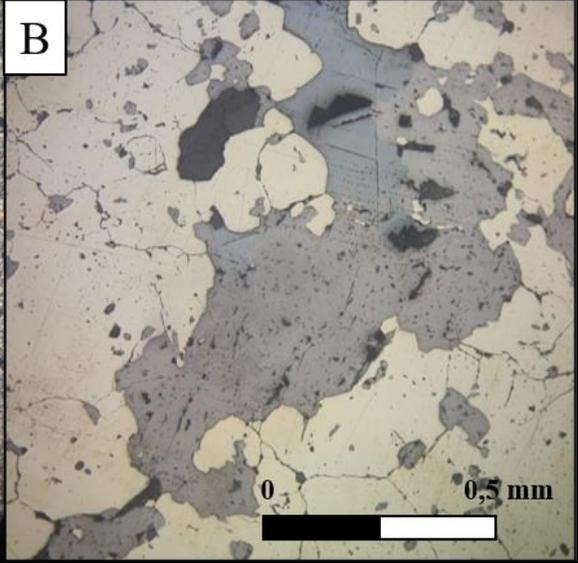
ANEXO 2: FICHAS CON DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE CORTES PULIDO-TRANSPARENTES.

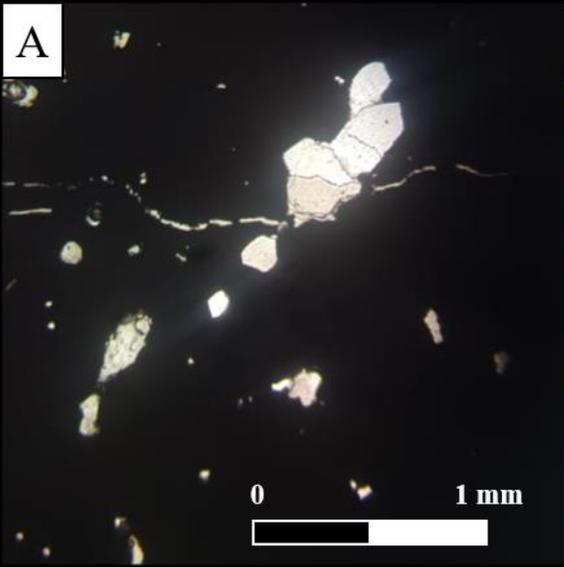
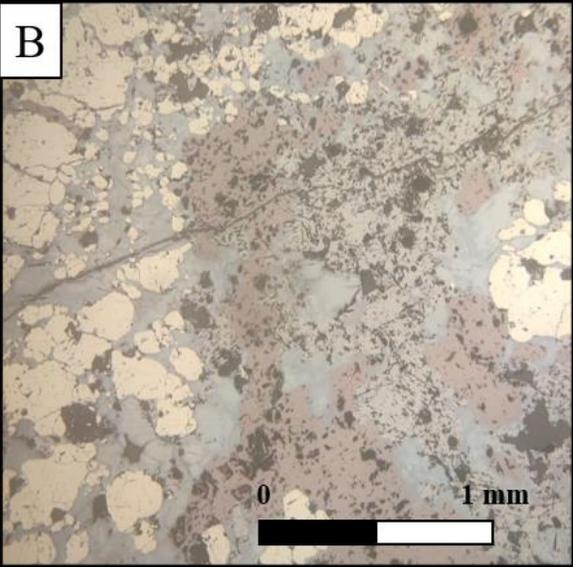
Muestra microscópica 1	M-01	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">A</div>  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 10px;">B</div>  </div> <p data-bbox="298 1020 1406 1052">A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles paralelos (np). B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>Es posible distinguir plagioclasas de la roca original, sin embargo, estas se encuentran muy alteradas a sericita y arcillas, también hay gran cantidad de clorita, actinolita y epidota. Predomina la alteración propilítica y como segunda alteración está la argílica. Además, existen vetillas finas de 1-2 mm de espesor, continuas, compuestas de cuarzo secundario, en algunas partes se observa clorita al centro, y en otros calcita.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>Es posible observar que los minerales metálicos son de pequeño tamaño, algunos granos son casi indistinguibles en el máximo aumento, dentro de los sulfuros de cobre solo se observa calcopirita, de manera diseminada como en vetillas en conjunto con pirita, esta última solo fue posible distinguirla es las vetillas milimétricas cubriendo gran parte de estas en conjunto con cuarzo secundario. Además, se distingue de forma diseminada y en granos pequeños en todo el corte hematita, magnetita y rutilo. En este corte no fue posible observar enargita ni otro mineral contenedor de arsénico.</p>	

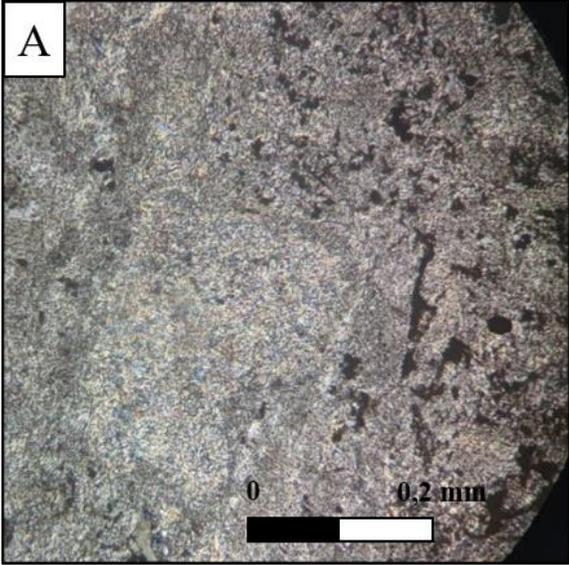
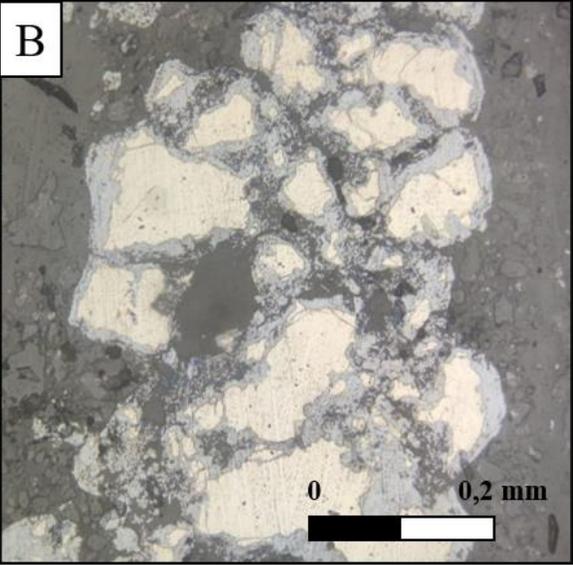
Muestra microscópica 2	M-03	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p data-bbox="280 279 337 331">A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p data-bbox="846 279 902 331">B</p> </div> </div> <p data-bbox="280 835 1386 863">A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados (nc). B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p data-bbox="269 978 466 1119">Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p data-bbox="518 898 1463 1203">Al observar el corte es posible distinguir una textura porfídica de la roca original, se observan unos fenocristales de plagioclasas que están muy alterados a arcillas y sericita, se aprecia también bastante muscovita y cuarzo, además de pirofilita en gran cantidad y alunita, predomina la alteración argílica avanzada en el corte. Se observan vetillas milimétricas no continuas que contienen cuarzo secundario</p>	
<p data-bbox="269 1446 466 1587">Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p data-bbox="518 1228 1463 1808">En luz reflejada es posible notar que predomina la calcopirita, la que se encuentra tanto diseminada como en vetillas relleno de espacios, es posible verla junto a pirita, así como con bornita, los cristales están rotos y se observa una textura de reemplazo con esta última, la bornita se encuentra sola en vetillas irregulares y milimétricas, y de manera diseminada siendo reemplazada por digenita. La pirita se encuentra tanto diseminada como en vetillas milimétricas discontinuas. Finalmente se distinguen en algunas partes del corte una agrupación de varios minerales de formas irregulares, de tamaño pequeño y cercanos entre sí, que corresponden a óxidos de hierro, rutilo, y los minerales antes mencionados. No se distingue minerales portadores de arsénico.</p>	

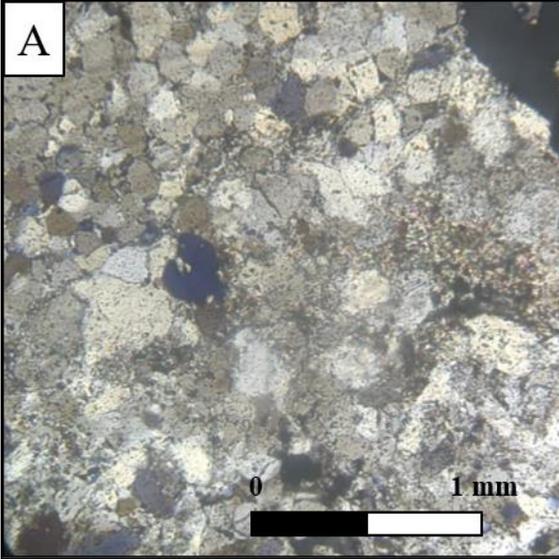
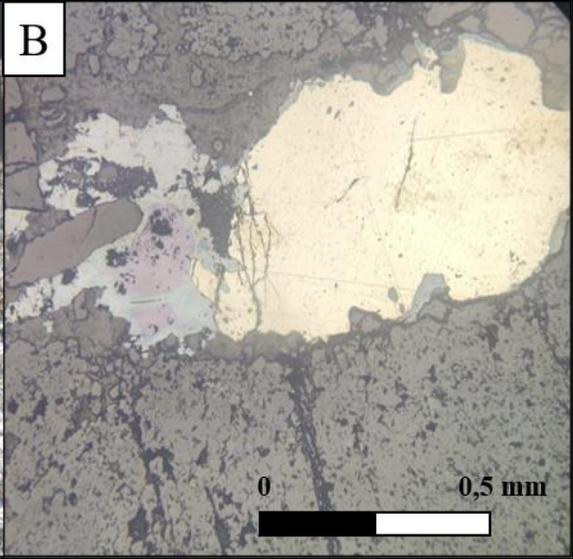
Muestra microscópica 3	M-06	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">A</div>  <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 10px;">B</div>  </div> <p data-bbox="297 831 1357 863">A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
Descripción de corte en luz transmitida	<p data-bbox="516 896 1463 1150">En luz transmitida no se distingue la textura de la roca original, esta se encuentra totalmente obliterada, el corte contiene baja cantidad de minerales translúcidos, y se compone principalmente de cuarzo secundario que se observa tanto en vetillas como en cúmulos, y en menor medida de arcillas, predomina la silicificación como alteración.</p>	
Descripción de corte en luz reflejada	<p data-bbox="516 1173 1463 1808">En luz reflejada se observa gran cantidad de metálicos, en su mayoría corresponde a pirita, la cual se encuentra diseminada y en cúmulos en el corte, aunque también se aprecia digenita, enargita y bornita. Se observa una textura de reemplazo entre bornita y digenita en todo el corte, es posible verlos de manera diseminada, en cúmulo con los otros minerales y en vetillas milimétricas irregulares y discontinuas. Este es un corte que contiene gran cantidad de enargita, esta se encuentra tanto diseminada como en cúmulos, en algunos sectores del corte se observa en forma de cristales tabulares y en otros como una gran masa sin forma aparente, solo rellenando espacios, se puede ver una cierta relación con la digenita y la bornita, sin embargo, no queda claro si es un reemplazo o intercrecimiento.</p>	

Muestra microscópica 4	M-07	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles paralelos (np). B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida se observa textura porfídica de la roca original, hay fenocristales de cuarzo y plagioclasas de gran tamaño, estas últimas se encuentran alteradas de manera pervasiva a sericita y a arcillas, hay gran cantidad de cuarzo secundario y abunda la clorita a lo largo de todo el corte, siendo la alteración propilítica la que predomina. Además, se observan vetillas de no más de 3 mm continuas, compuesta de cuarzo secundario, clorita y minerales metálicos.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>No se observa gran cantidad de minerales en luz reflejada, entre los minerales que se distinguen esta la pirita, calcopirita, hematita, magnetita y rutilo, estos minerales se encuentran diseminados a lo largo del corte, y no tienen gran tamaño, es posible ver unos granos que muestran un reemplazo entre hematita y magnetita. En vetillas se puede apreciar tanto pirita como calcopirita, relleno de espacios, estas son continuas y rectas, se encuentran en conjunto con cuarzo secundario y clorita. Este corte no contiene minerales portadores de arsénico.</p>	

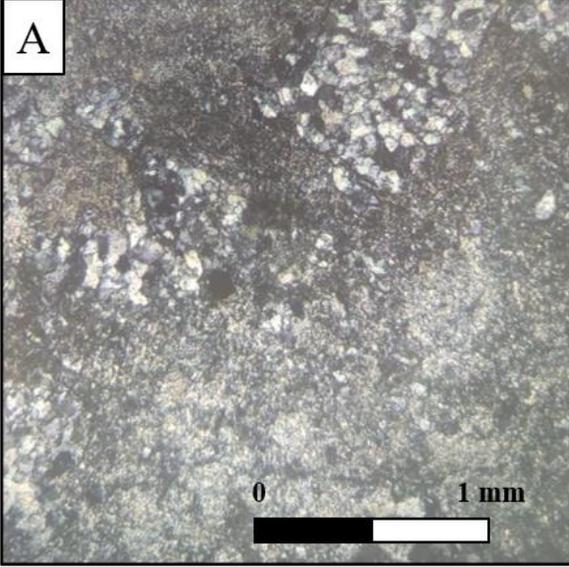
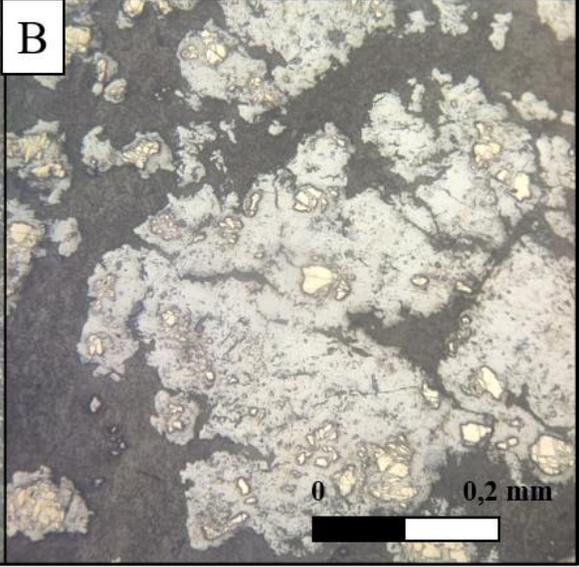
Muestra microscópica 5	M-10	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicóles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>Es posible observar que roca original está completamente obliterada, los minerales que se encuentran son de pequeño tamaño, hay textura fina, se observa gran cantidad de cuarzo secundario y arcillas, así como también pirofilita y alunita, siendo la alteración argílica avanzada la que predomina en el corte y de manera pervasiva. Se observan vetillas milimétricas, discontinuas rellenas con cuarzo secundario.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>En cuanto a la luz reflejada, gran parte del corte está cubierto por pirita, está en cúmulos, en vetilla, y también se observa de manera diseminada junto con bornita y digenita, los cuales muestran una textura de reemplazo, con estos minerales también se aprecia gran cantidad de enargita, en su mayoría está como relleno de espacios, hay granos tabulares los cuales están diseminados en la gran masa de pirita, así como también se observa junto con bornita y digenita, con este último se infiere que hay otro evento donde se deposita enargita, lo que la hace posterior a estos minerales, ya que envuelve por los bordes de los cristales de ambos minerales. Además, hay una gran vetilla de 1.5 cm de espesor que está compuesta de pirita, bornita, digenita y enargita, esta es continua y recta.</p>	

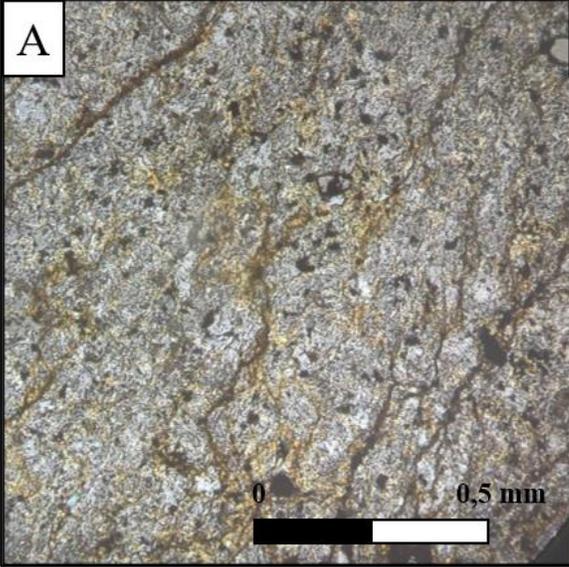
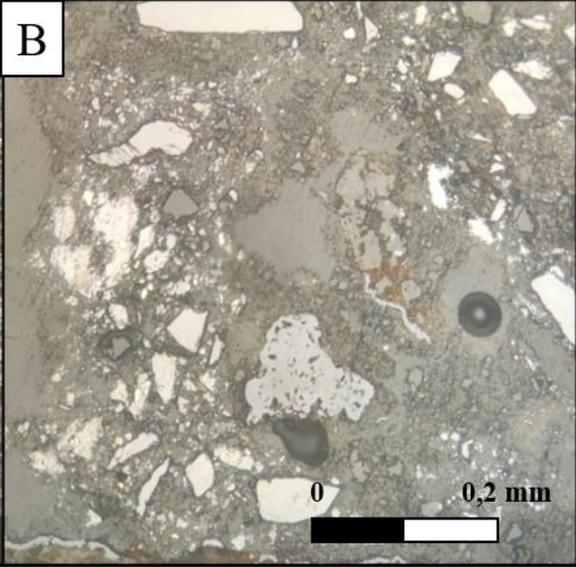
Muestra microscópica 6	M-11	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
Descripción de corte en luz transmitida	<p>En luz transmitida casi no es posible observar minerales translúcidos, por ende, no se distingue ni textura original, ni alteración que predomina, se ven unos pocos cristales de cuarzo que están diseminados por el corte, casi la totalidad de la muestra corresponde a minerales metálicos.</p>	
Descripción de corte en luz reflejada	<p>Dentro de los minerales que es posible distinguir en luz reflejada está pirita, bornita, digenita, calcosina y enargita, estos minerales están de manera masiva, cubriendo todo el corte, se observa gran cantidad de pirita que se encuentra de manera diseminada en granos de diferentes tamaños, la digenita y la calcosina están alrededor de la bornita, como textura de reemplazo, esta última contiene granos de gran tamaño en el corte, además se observan cristales de enargita, los de menor tamaño y forma más definida se encontraban de manera diseminada con pirita, sin embargo, también es posible distinguirla en forma de cúmulo y asociada a calcosina, se distribuía por los bordes de este último.</p>	

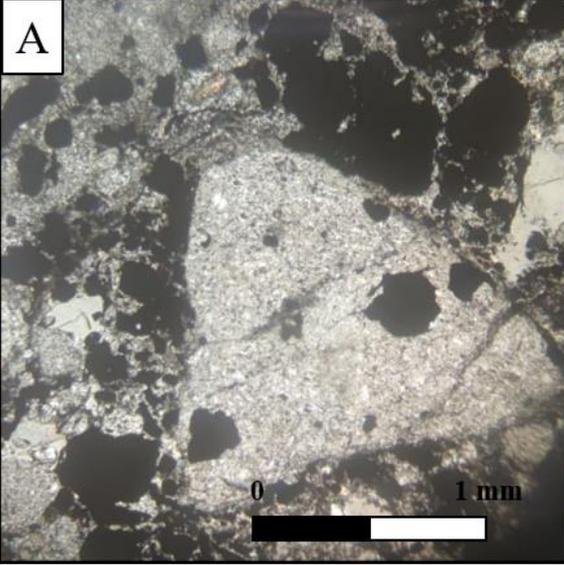
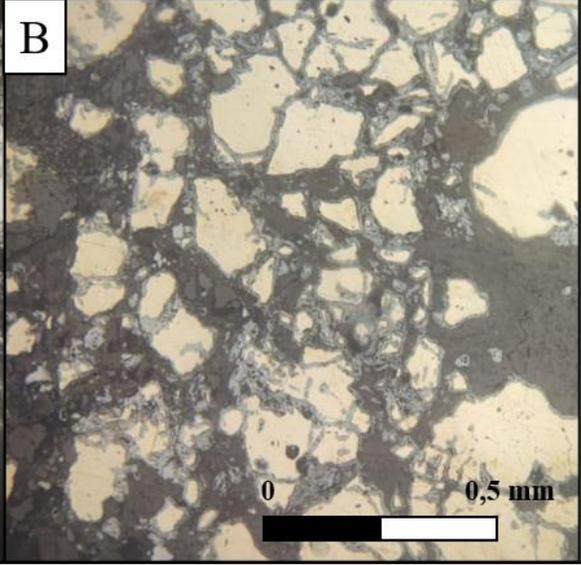
Muestra microscópica 7	M-14	Fase 13
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida se logran distinguir algunos fenocristales de plagioclasa, se distingue una textura porfídica, estas están muy alteradas a sericita y en general el corte completo, también se observan clastos angulosos con restos de otra roca, además hay abundante cuarzo secundario, y alunita junto con pirofilita, indicando que la alteración que predomina es la alteración argílica avanzada y como secundaria está la alteración argílica intermedia por el contenido de arcillas.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>En luz reflejada no se observa gran cantidad de minerales metálicos, pero es posible distinguir pirita, la cual esta diseminada, en vetillas y en cúmulos, en gran parte del corte la pirita está asociada a la calcosina, este mineral está rodeando a las piritas, otro mineral que se observa es calcopirita, pero solo unos pequeños granos los cuales están diseminados en el corte. Se distinguen varias vetillas muy finas, la mayoría de máximo 1 mm son rectas y discontinuas, están rellenas de pirita principalmente y algunas de pirita con calcosina alrededor. Además, se observa granos pequeños de rutilo en todo el corte, y que es confirmado mediante análisis QUEMSCAN.</p>	

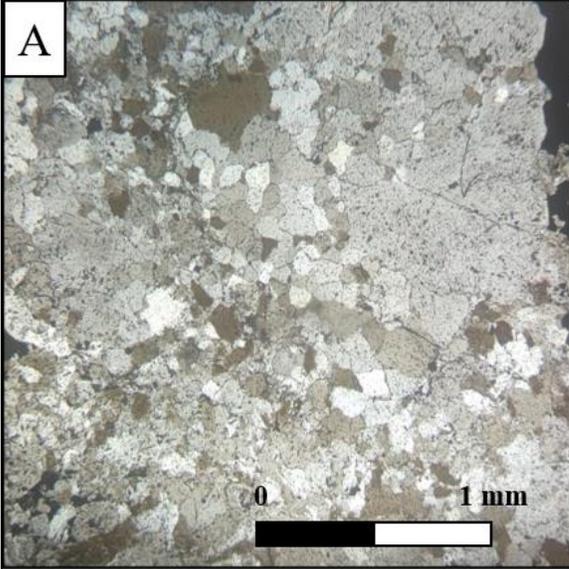
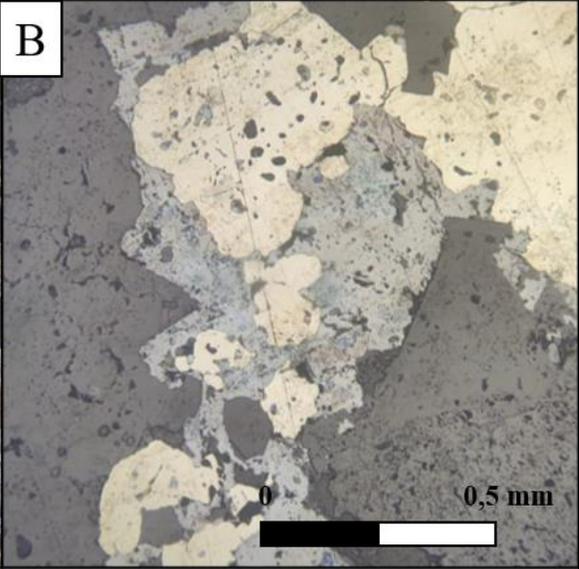
Muestra microscópica 8	M-16	Fase 13
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicules cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida no es posible distinguir textura original de la roca, se observa gran cantidad de cuarzo secundario, también se aprecia pirofilita, alunita, arcillas y sericita, pero en menor proporción, en el corte predomina la alteración argílica intermedia por el alto contenido de arcillas que se observaron y como alteración secundaria está la argílica avanzada. Además, se distinguen vetillas milimétricas compuestas de cuarzo secundario y minerales metálicos.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>En luz reflejada se observa que no hay gran proporción de metálicos, la mayoría se encuentra en vetillas, como relleno de espacios y corresponde principalmente a pirita, también se observan minerales como enargita, digenita, bornita, calcosina y covelina. La digenita con la calcosina se aprecian como textura de reemplazo de bornita, y se observan tanto en vetilla como de manera diseminada en el corte. La enargita solo es posible observarla en un borde del corte y como un cúmulo que se encuentra en intercrecimiento junto a los sulfuros de cobre antes mencionados y pirita. La mayor parte de los minerales forman parte de vetillas, se observan en diferentes direcciones, tienen tamaño de 1 a 5 mm, hay tanto rectas como sinuosas y algunas continuas a lo largo de todo el corte.</p>	

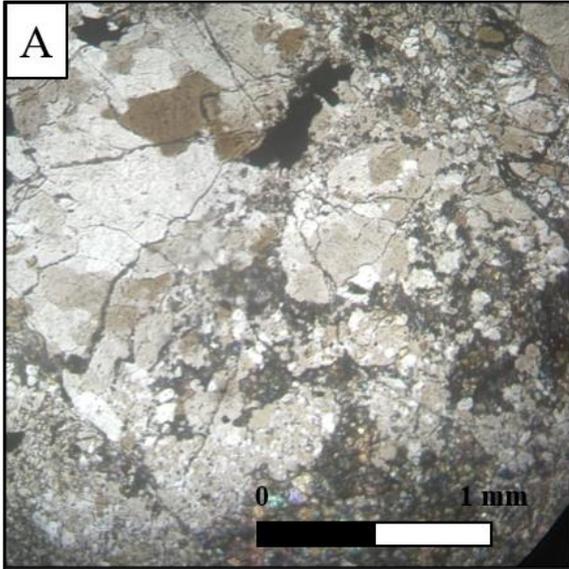
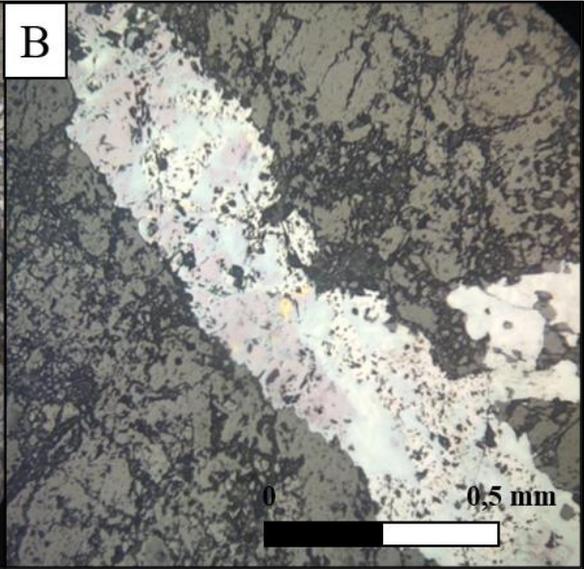
Muestra microscópica 9	M-17	Fase 13
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="272 262 841 829"> </div> <div data-bbox="841 262 1425 829"> </div> </div> <p data-bbox="277 831 1338 863">A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicules cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida casi no se observan minerales, la roca original está completamente obliterada, solo hay unos cristales de cuarzo secundario, poca cantidad de arcillas, y se distingue también alunita, pero no es posible determinar una alteración, ya que prácticamente todo el corte son minerales metálicos.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>El corte contiene gran cantidad de minerales metálicos, y en su mayoría corresponde a calcosina, se puede observar que los granos de este mineral tienen gran tamaño, se forman grandes cúmulos, aunque también es posible observar granos más pequeños que se encuentran diseminados, otros minerales que son posible de distinguir aunque es pequeña proporción es bornita con calcopirita, están inmersos en la calcosina y aparentemente están siendo reemplazados por este último, finalmente también se observa pirita dentro de la calcosina casi como si la calcosina la envolviera, los granos se encuentran muy fracturados y son de diferente tamaño, en esta muestra no es posible distinguir minerales portadores de arsénico.</p>	

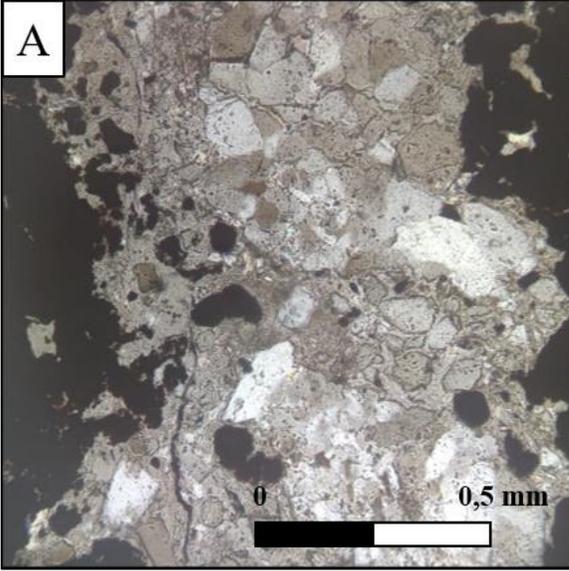
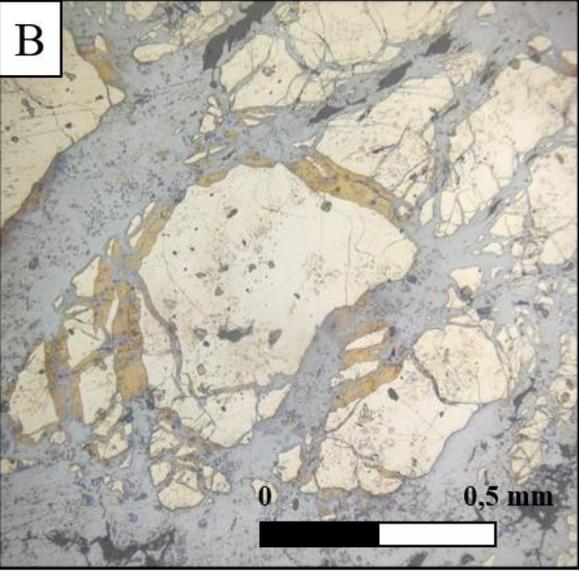
Muestra microscópica 10	M-18	Fase 13
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida se pueden observar cristales grandes de cuarzo, junto con gran cantidad de cuarzo secundario, sericita, arcillas, y en menor proporción pirofilita, la alteración que predomina es la argílica intermedia por el alto contenido de arcillas que se observan. Además, se observa una vetilla gruesa que ocupa gran parte del corte, es continua y algo irregular, está rellena de cuarzo secundario en conjunto con minerales metálicos.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>En luz reflejada, se aprecia que la gran mayoría de los minerales forman parte de una gran vetilla de 8 mm que es continua a lo largo de todo el corte, esta contiene calcosina en gran proporción y alrededor granos de pirita que se encuentran muy fracturados y son de pequeño tamaño, también es posible observar minerales diseminados en el corte, como calcopirita, pirita, calcosina y covelina, pero en muy poca proporción. En este corte no fue posible distinguir minerales portadores de arsénico.</p>	

Muestra microscópica 11	M-20	Fase 13
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida se observa que la roca está altamente alterada, se encuentra totalmente obliterada la textura original, se distingue gran cantidad de cuarzo secundario, de textura muy fina, además de esto se ve gran cantidad de arcillas en el corte y epidota, y en menor proporción pirofilita junto con alunita, predomina la alteración argílica intermedia. Además de esto, se aprecian vetillas de no más de 1 mm que en su interior contienen cuarzo secundario.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>En luz reflejada no hay cantidad de minerales, sin embargo, lo que se ven son de diferentes tamaños, en su mayoría corresponde a hematita, también se observan goetita, jarosita y rutilo cubriendo el corte, y en menor proporción en posible distinguir calcopirita y pirita. Los minerales se observan tanto de manera diseminada como en vetillas, hay una especie de clastos que contienen los minerales antes mencionados, los cuales están fracturados y son de pequeño tamaño, en cuando a las vetillas estas son variadas, tienen hasta 3 mm, son irregulares y algunas continuas, están compuesta por óxidos de hierro, en este corte no fue posible distinguir minerales portadores de arsénico.</p>	

Muestra microscópica 12	M-21	Fase 13
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicóles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida se observa que la roca original está completamente obliterada, hay muy poca cantidad de minerales translucidos, entre ellos está el cuarzo secundario, micas, arcillas, pirofilita y alunita, y es la alteración argílica avanzada la que predomina considerando los minerales presentes, y en menor proporción está la alteración argílica intermedia por las arcillas. Es posible distinguir unas vetillas finas y continuas rellenas de cuarzo secundario.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>En luz reflejada se observa que el corte está cubierto en gran parte por pirita, se encuentra de manera diseminada y presenta cristales de diferentes tamaños, algunos de ellos tienen calcosina a su alrededor, este último mineral se distingue en gran proporción en el corte, aunque siempre asociado a pirita, la pirita también se encuentra en vetillas que son irregulares y discontinuas. Es posible observar también granos de calcopirita junto con bornita, pero son de pequeño tamaño y se encuentran diseminados en el corte. No es posible distinguir minerales portadores de arsénico.</p>	

Muestra microscópica 13	M-22	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicóles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida se observan pocos minerales, casi todo el corte corresponde a metálicos, la textura original está completamente obliterada, dentro de los minerales translúcidos que se distinguen, en su mayoría son granos de cuarzo secundario, es posible apreciarlo en vetillas, las cuales son discontinuas y diseminados en el corte, además hay una pequeña cantidad de arcillas.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>En luz reflejada se aprecia gran cantidad de pirita, la mayor parte del corte corresponde a este mineral, se encuentra de manera masiva en cúmulos, aunque en algunos sectores se observan como cristales bien formados diseminados, también es posible distinguir minerales como enargita, bornita y calcosina, los cuales están como relleno de espacios en microfracturas de la roca principalmente, en su mayoría se observan diseminados en todo el corte, entre la bornita y la calcosina se observa una textura de reemplazo, y en cuanto a la enargita es posible apreciarla en contacto en los borde con calcosina, lo que indicaría que este mineral fue más tardío, y en algunas partes se ve solo enargita en granos bien formados diseminados dentro de la gran masa de pirita.</p>	

Muestra microscópica 14	M-23	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
<p>Descripción de corte en luz transmitida</p>	<p>En luz transmitida, se observa que la muestra está muy alterada, no se distingue la textura original, ya que está completamente obliterada. Se distingue gran cantidad de cuarzo secundario cubriendo gran parte del corte, es posible apreciar vetillas de este mineral, y también observar cristales de mayor tamaño de cuarzo, junto con esto hay sericita, y abundantes arcillas, en menor proporción se observa epidota y pirofilita. Predomina la alteración argílica por el alto contenido de arcillas.</p>	
<p>Descripción de corte en luz reflejada</p>	<p>En luz reflejada se observa que gran parte de los metálicos se encuentran en vetillas, que en su mayoría son continuas y rectas. La pirita se distingue en granos diseminados tanto en las vetillas como en cúmulos. La calcopirita, está siendo reemplazada por bornita, quedando solo relictos de este mineral tanto en bordes como dentro de la bornita, también es posible distinguir gran cantidad de calcosina la que reemplaza a bornita, principalmente en las debilidades del mineral, finalmente se aprecia enargita tanto en vetillas relleno de espacios junto con los minerales antes mencionados y siempre en contacto directo con calcosina, también es posible observarla en cúmulos, como una gran masa, la que en su interior contiene minerales, dando la apariencia de que fue posterior a ellos.</p>	

Muestra microscópica 15	M-24	Fase 11
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>A</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>B</p> </div> </div> <p>A. Fotomicrografía en luz transmitida y nicoles cruzados. B. Fotomicrografía en luz reflejada y np.</p>		
Descripción de corte en luz transmitida	<p>En luz transmitida se observa que la roca original está completamente obliterada, el corte está altamente alterado, y cuenta con muy pocos minerales translúcidos, se aprecia algo de cuarzo secundario, pero lo que abunda son las arcillas, junto con pirofilita y alunita, la alteración que predomina por la asociación de minerales es argílica avanzada.</p>	
Descripción de corte en luz reflejada	<p>Hay gran cantidad de metálicos en el corte, al verlo en luz reflejada en su mayoría corresponde a calcosina, la cual está principalmente en forma diseminada en el corte, así como también formando una gran masa que envuelve a otros minerales, además, en ciertas ocasiones se encuentra alrededor de cristales de pirita que se observan bastante fracturados, este último se aprecia también en finas vetillas en algunas partes del corte, otros minerales que es posible observar, pero es menor proporción es bornita la cual está reemplazando a calcopirita, estos minerales se encuentran dentro de cúmulos de calcosina la cual está reemplazando a los dos minerales antes mencionados, con esta asociación es posible observar granos diseminados de pirita de diferentes tamaños. En el este corte no fue posible distinguir enargita</p>	

ANEXO 3: RESULTADOS ANÁLISIS QEMSCAN DE MUESTRAS EN ESTUDIO

Tabla 1. Tamaño promedio (micrones) de las especies minerales contenidas en los cortes.

Minerals/samples	Calculated ESD Size (µm)														
	M-01	M-03	M-06	M-07	M-10	M-11	M-14	M-16	M-17	M-18	M-20	M-21	M-22	M-23	M-24
Chalcopyrite	41,2	61,7	23,3	83,4	23,5	24,9	24,3	23,0	24,5	24,6	29,4	24,9	23,5	24,8	25,4
Bornite	0,0	52,4	60,6	22,0	48,3	124,1	23,1	27,0	23,7	23,2	22,9	23,4	30,5	72,5	24,3
Chalcocite/Digenite/Covellite	22,0	26,1	48,9	23,9	38,1	77,7	44,9	74,3	119,2	100,7	26,8	33,1	74,6	55,9	125,3
Cu.As-sulphide (Enargite)	22,0	22,0	106,5	22,0	78,4	76,4	22,0	38,1	26,0	22,0	28,1	58,0	47,4	42,0	
Galena	22,0	22,0	22,1	22,0	22,1	22,1	22,3	22,0	22,4	23,2	22,0	22,0	22,4	22,1	22,0
Pyrite	281,5	30,2	198,3	76,8	305,2	139,6	59,5	310,9	35,0	29,8	29,4	97,6	545,7	103,5	45,1
Other Sulphides	22,0	41,0	23,1	25,1	22,4	56,3	22,7	39,2	28,8	41,5	22,0	24,8	26,5	30,3	25,0
Chrysocolla	22,0	22,5	23,5	22,9	22,6	22,3	22,9	23,0	22,6	27,7	22,3	23,9	22,8	23,1	22,3
Malachite/Azurite	0,0	22,0	22,0	0,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,1	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0
Cu-sulphate	22,0	22,1	22,3	22,0	25,9	22,4	22,8	22,3	22,4	22,6	22,2	23,0	22,3	22,2	22,5
Mn- Black Copper	22,7	22,0	22,1	22,0	22,0	22,5	22,0	22,0	22,0	22,4	44,6	22,3	22,3	22,2	22,2
Quartz	63,6	140,0	143,3	79,3	173,6	90,0	48,0	240,4	86,1	104,8	75,4	93,3	352,4	163,0	52,6
Felspar (Plagioclase-K-Feldspar)	58,6	24,2	22,4	89,2	22,2	22,0	25,4	22,1	22,2	23,5	22,3	23,3	22,9	22,3	22,4
Pyroxene-Amphibole	40,0	23,8	22,6	22,6	24,3	24,4	22,4	22,2	26,9	22,5	26,2	23,6	23,7	22,2	23,9
Biotite/Phlogopite	40,9	22,9	22,0	24,0	23,1	22,0	24,3	22,0	22,0	22,2	22,1	22,4	26,4	22,5	22,0
Chlorite	32,6	29,2	45,2	57,6	22,9	37,4	24,5	22,5	23,2	26,9	30,6	22,6	31,6	23,2	29,7
Muscovite	26,4	103,4	22,0	38,8	23,1	30,2	72,6	22,2	22,1	58,0	22,1	39,8	22,6	23,2	22,2
Clays	24,8	22,2	42,5	24,8	33,5	33,6	22,3	56,4	42,5	53,5	30,2	40,6	56,6	42,9	46,9
Epidote	23,2	22,0	22,3	25,2	36,9	22,0	22,1	30,1	23,5	22,3	28,1	24,7	24,2	24,8	22,5
Accessory Minerlas (Tour-Zir-Ap-Corun-Sphen)	25,4	48,7	23,7	59,9	57,9	24,6	36,6	27,5	31,7	27,1	46,6	38,6	34,5	46,7	29,0
Ca Sulphates	22,3	23,4	22,1	23,7	22,4	22,4	25,2	23,2	22,4	23,2	22,2	23,2	22,4	22,9	22,5
Carbonates (Ca-Fe-Mg)	31,3	22,3	24,2	23,2	25,6	22,0	24,6	23,0	29,8	22,7	24,6	25,0	23,5	25,6	25,1
Jarosite	22,8	24,9	23,2	24,6	23,8	22,8	25,3	23,2	22,6	26,7	30,5	26,5	23,0	25,4	22,9
Alunite	22,6	22,3	22,3	22,1	75,8	22,9	22,9	23,5	35,3	23,3	22,3	22,4	23,0	22,5	33,1
Fe-Ti-Oxides-Hydroxides	25,8	22,7	23,7	45,0	23,2	22,5	22,7	23,2	22,8	25,8	34,9	22,6	22,1	22,8	23,6
Rutile/Anatase	23,6	35,0	24,5	27,4	28,7	22,0	25,5	29,9	23,3	32,1	25,6	24,4	32,4	26,6	25,7
Other	23,3	22,9	23,6	23,1	22,7	22,9	23,8	23,2	23,4	23,7	23,3	23,4	23,3	23,1	23,7

Tabla 2. Valores de los porcentajes de Cu aportados por las especies que contienen este mineral.

Minerals/samples	Mass Cu (wt.%)														
	M-01:	M-03:	M-06:	M-07:	M-10:	M-11:	M-14:	M-16:	M-17:	M-18:	M-20:	M-21:	M-22:	M-23:	M-24:
Chalcopyrite	0,04	1,19	0,50	0,23	0,21	0,94	0,17	0,08	1,16	0,10	0,45	1,91	0,11	0,29	1,13
Bornite	0,00	0,48	3,18	0,00	0,23	14,23	0,11	0,09	1,14	0,06	0,11	1,91	0,12	3,03	1,27
Chalcocite/Digenite/Covellite	0,00	0,04	12,01	0,00	1,05	23,58	2,12	3,22	60,65	10,29	0,45	14,74	2,39	10,88	63,40
Cu.As-sulphide (Enargite)	0,00	0,00	6,98	0,00	1,47	6,01	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,10	0,10	2,33	0,48
Pyrite	0,00	0,00	0,11	0,00	0,05	0,16	0,02	0,01	0,14	0,01	0,00	0,31	0,02	0,01	0,14
Other Sulphides	0,00	0,00	0,04	0,00	0,03	0,21	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01
Chrysocolla	0,00	0,01	0,13	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,05	0,33	0,01	0,22	0,01	0,08	0,05
Malachite/Azurite	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01
Cu-sulphate	0,00	0,02	0,07	0,00	0,03	0,01	0,06	0,02	0,26	0,11	0,02	0,63	0,01	0,05	0,25
Mn- Black Copper	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00

Tabla 3. Valores de leyes de As, Cu y Fe determinados por la presencia de las especies que contienen estos elementos.

Elements/Samples	Mass (%)														
	M-01:	M-03:	M-06:	M-07:	M-10:	M-11:	M-14:	M-16:	M-17:	M-18:	M-20:	M-21:	M-22:	M-23:	M-24:
As	0,00	0,00	2,76	0,00	0,59	2,37	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04	0,04	0,92	0,19
Cu	0,06	1,75	23,03	0,23	3,09	45,15	2,50	3,47	63,76	11,25	1,18	19,94	2,78	16,72	66,89
Fe	3,98	1,24	22,45	1,41	24,18	18,08	0,92	9,83	2,88	0,26	6,28	24,61	37,19	2,15	3,38

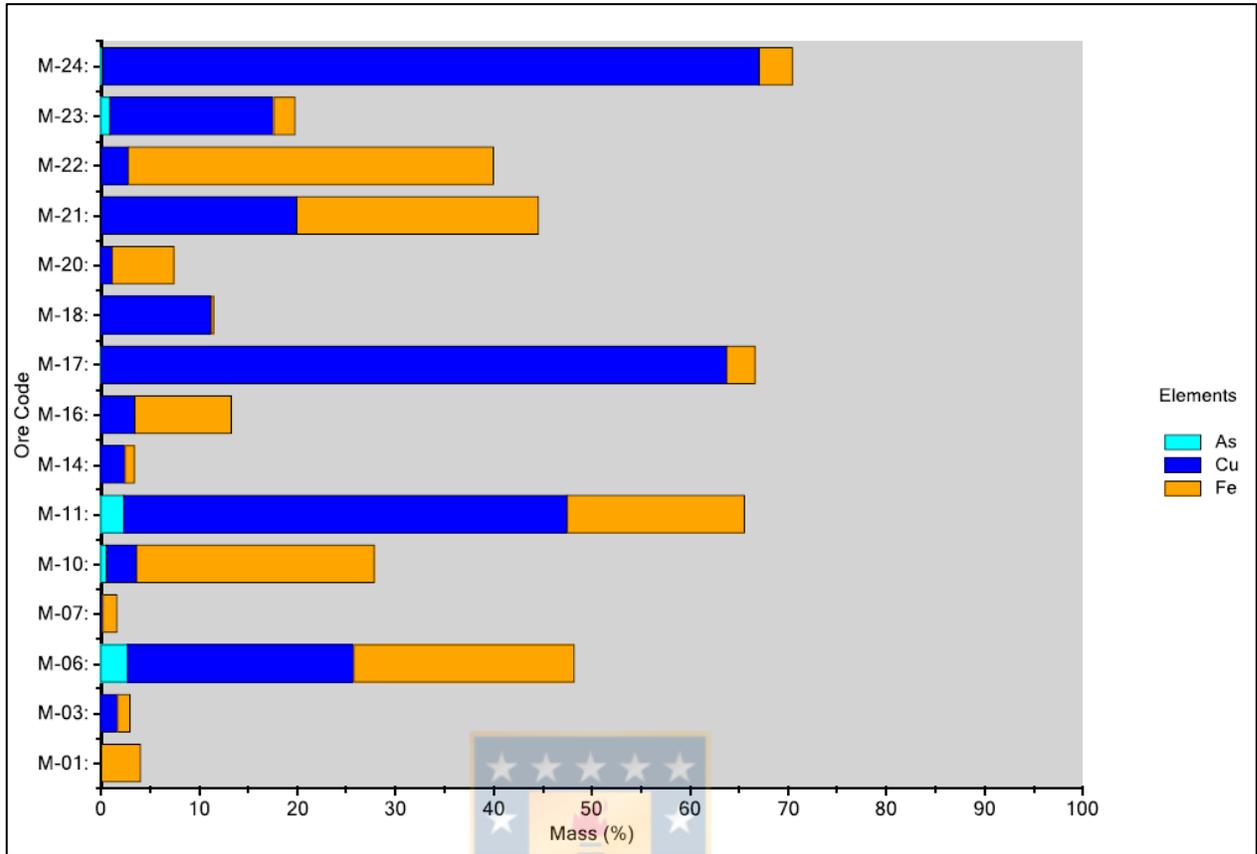
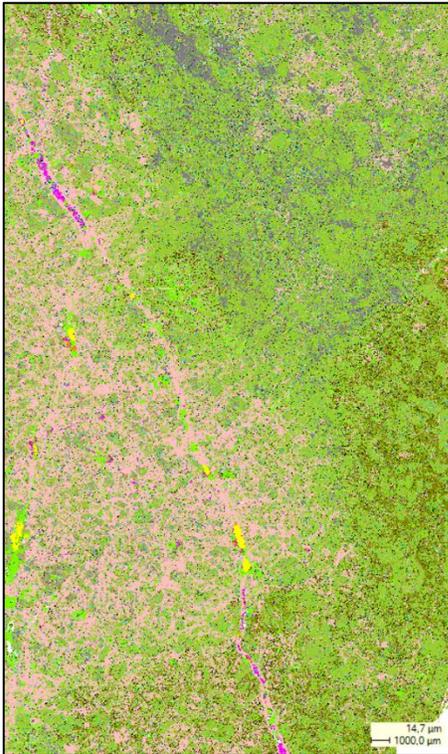


Figura 1. Diagrama de barras con los aportes de As-Cu-Fe (%) en cada muestra, de acuerdo al contenido medido de las especies portadoras.

ANEXO 4: IMÁGENES DE FIELDSCAN, ANÁLISIS TEXTURAL

M-01

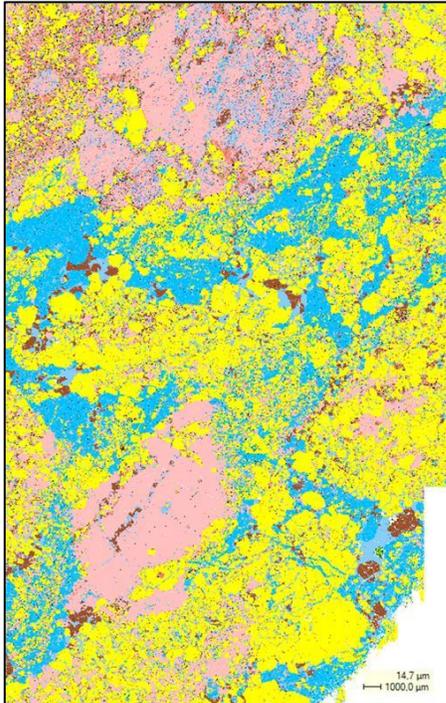


M-03

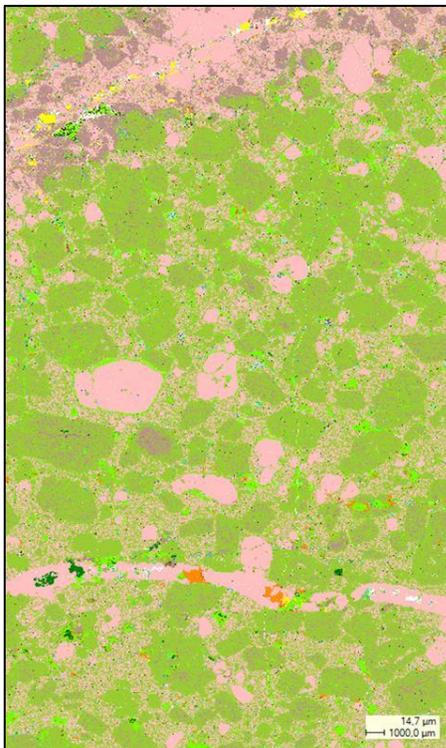


□	Background
■	Chalcopyrite
■	Bornite
■	Chalcocite/Digenite/Covellite
■	Cu.As-sulphide (Enargite)
■	Galena
■	Pyrite
■	Other Sulphides
■	Chrysocolla
■	Malachite/Azurite
■	Cu-sulphate
■	Mn- Black Copper
■	Quartz
■	Felspar (Plagioclase-K-Feldspar)
■	Pyroxene-Amphibole
■	Biotite/Phlogopite
■	Chlorite
■	Muscovite
■	Clays
■	Epidote
■	Accesory Minerals (Tour-Zir-Ap--Corun-Sphen)
■	Ca Sulphates
■	Carbonates (Ca-Fe-Mg)
■	Jarosite
■	Alunite
■	Fe-Ti- Oxides-Hydroxides
■	Rutile/Anatase
■	Other

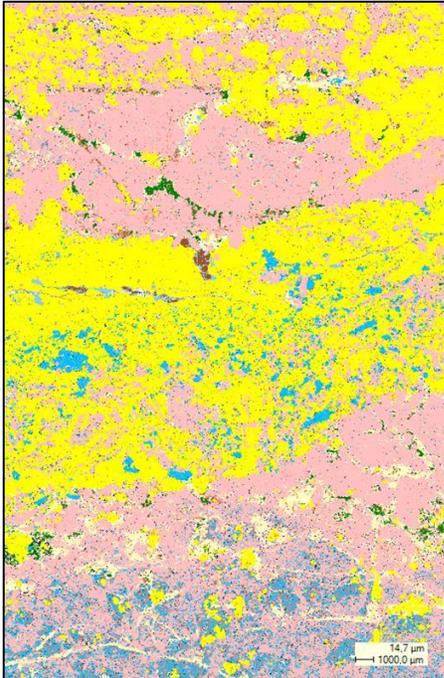
M-06



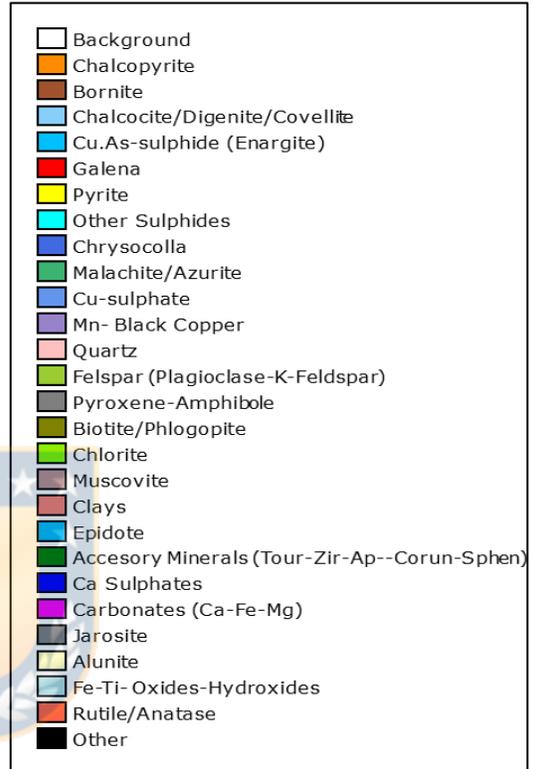
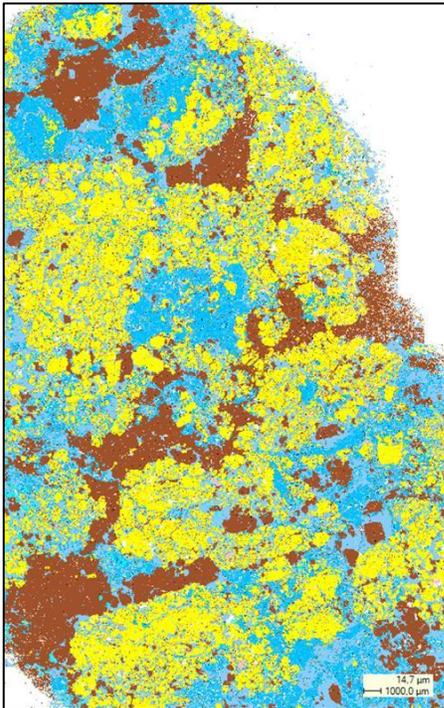
M-07



M-10



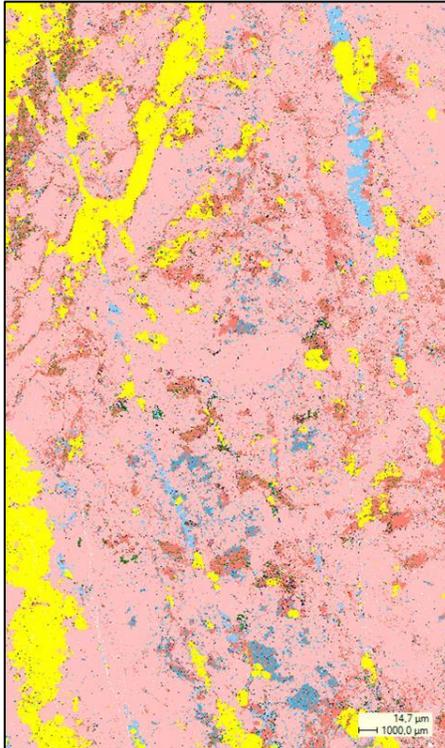
M-11



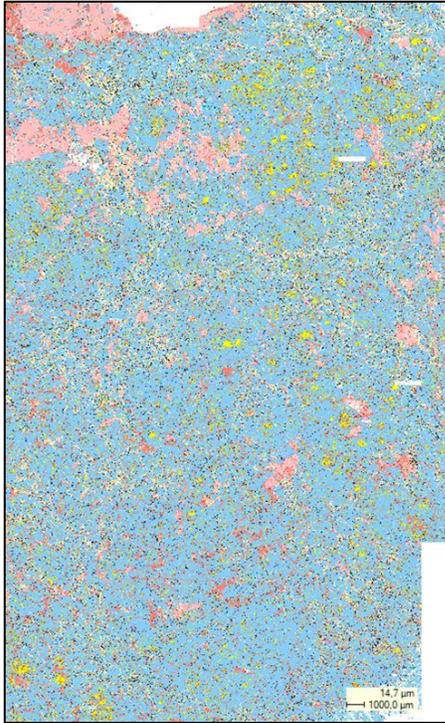
M-14



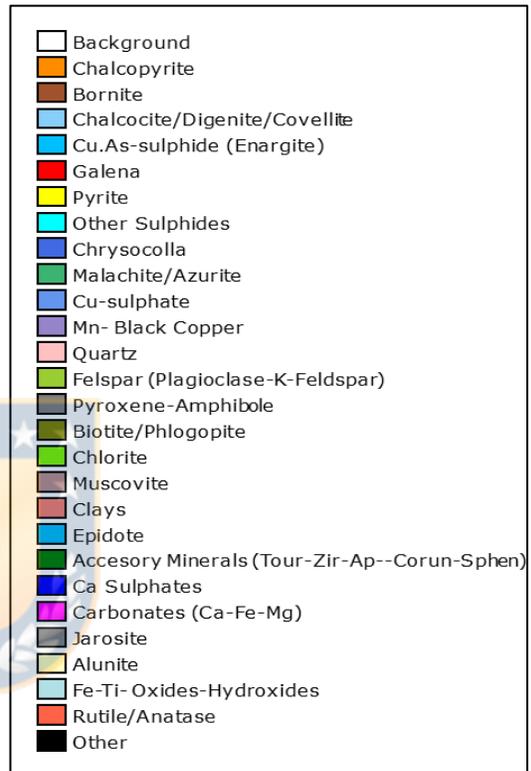
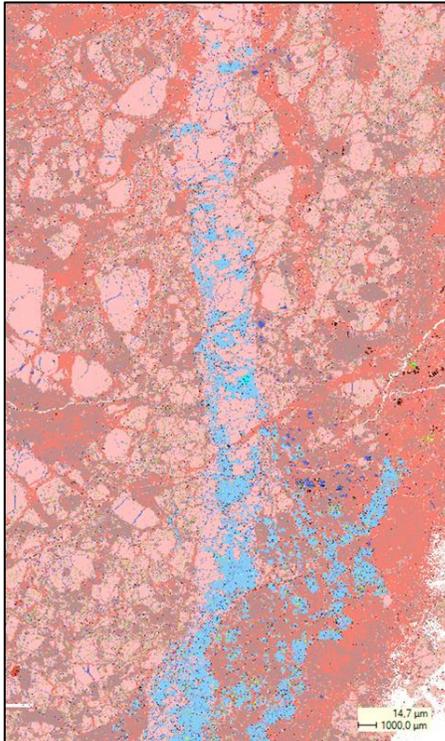
M-16



M-17



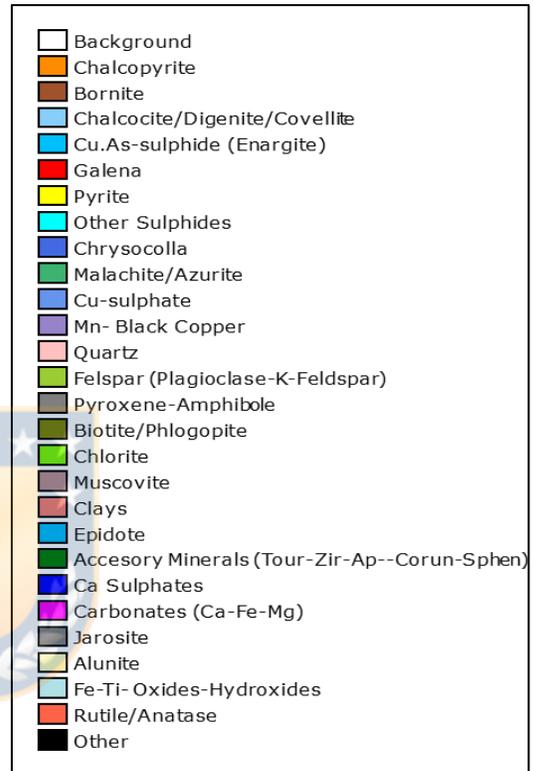
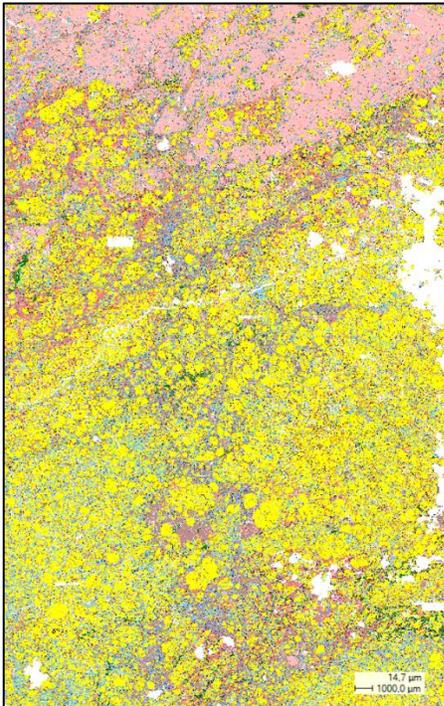
M-18



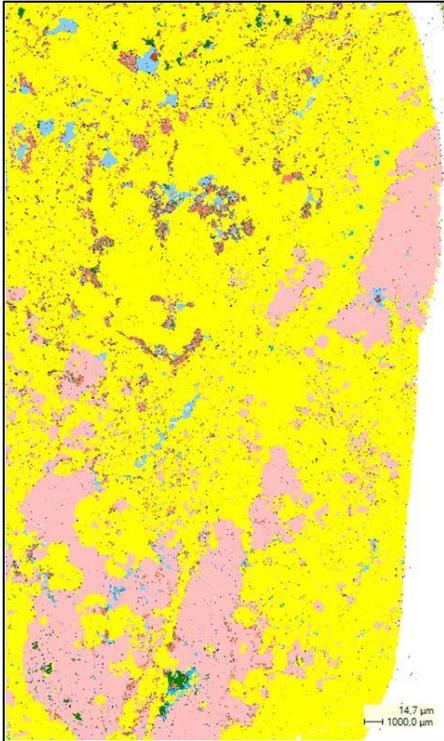
M-20



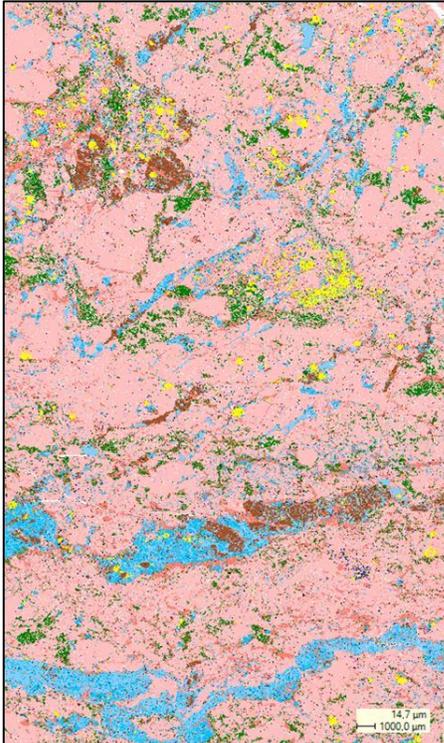
M-21



M-22



M-23



M-24

